

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Forestal



**“Evaluación de la Eficiencia de una Secadora Solar Portátil para Biomasa,
evaluada con fibra de piña, en cuatro sitios de Costa Rica”**

**Trabajo final de graduación para optar por el título de
Ingeniería Forestal con el grado académico de
Licenciatura**

Marco Antonio Solano Mata.

Cartago Junio, 2012

Resumen

Actualmente en Costa Rica se ha generado interés en la obtención y mejora de diversos productos de origen orgánico, para lo cual se necesita crear y mejorar los procesos existentes, entre los que destaca el secado, no solo para los productos como madera y granos, si no para el aprovechamiento de la biomasa en general. Estos materiales se caracterizan por la presencia de humedad y son susceptibles al deterioro si no se secan. Los métodos tradicionales, como los hornos convencionales no son muy rentables por sus altos costos de operación y complicados sistemas, de forma tal que el secado al aire es el más utilizado y difundido, aunque no es muy eficiente debido a las condiciones climáticas del país.

En el siguiente trabajo se presenta el diseño y evaluación de la eficiencia de un prototipo de secadora solar portátil en cuatro sitios de Costa Rica: Río Cuarto de Alajuela, Guácimo de Limón, Buenos Aires de Puntarenas y Cantón Central de Cartago. En el diseño se describen las principales partes de la secadora y como fueron construidas. La eficiencia se evaluó con respecto a la temperatura y humedad interna de la secadora, así como la influencia de la radiación solar directa e indirecta, humedad relativa y temperatura externa. Al final de la evaluación se llegó a mejorar el proceso y la eficiencia de la secadora solar, con el uso de un deshumidificador para controlar la humedad relativa y un sistema de calefacción en las horas de baja temperatura, baja radiación solar y alta humedad relativa.

Se comprobó el funcionamiento de la secadora utilizando para el secado, fibra de las hojas de la planta de piña. Se determinó la variación del contenido de humedad con respecto al tiempo, la hora de colocación de las muestras, el tiempo de secado y el contenido de humedad final al que se logró llegar. En general, se encontró que de 6 a 14 horas es el mejor intervalo para el secado de la fibra, y que luego de las 14 horas con los cambios de inyección de aire caliente y el uso de un deshumidificador, la secadora no pierde eficiencia.

Palabras clave: fibra de piña, secado al aire, secadora solar, humedad relativa, contenido de humedad, temperatura y radiación solar.

*Solano, M. 2012. Evaluación de la Eficiencia de una Secadora Solar Portátil para Biomasa, evaluada con fibra de piña, en cuatro sitios de Costa Rica. Cartago, C R. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 56 p.

Abstract

Currently in Costa Rica has been generated the interest for the obtaining and improving different products of organic origin, for which it is needed to create or improve existing processes, including drying out, not only for products but it in to the use of biomass in general. These materials are characterized by the presence of moisture and if they are not dried, they are susceptible to degradation. Traditional methods, such as ovens are not very profitable due to their high costs of operation and complicated operating systems, so air drying is the most common and diffused method these days; although, it is not very efficient due to the climatic conditions of the country.

The following paper presents the design and evaluation of the efficiency of a prototype portable solar dryer at four sites in Costa Rica: Rio Cuarto, Guácimo, Buenos Aires and Cartago. The design describes the main parts of the dryer and as they were built. The efficiency was evaluated based on the temperature and humidity inside the dryer, and the influence of solar radiation directly and indirectly, relative humidity and external temperature. At the end of the evaluation was reached improve the process and the efficiency of the solar dryer, by using a dehumidifier to control relative humidity and a heating system in times of low temperature, low solar radiation and high relative humidity.

It was possible to demonstrate the functioning of the dryer by using fiber leaves of the pineapple plant. The moisture content variation was determined based on the time, the hour of placement of the samples, the drying time and the final moisture content was obtained. In general it was found that from 6 to 14 hours is the best range for drying the fiber, and 14 hours after the injection changes with hot air and using a dehumidifier, the dryer does not lose efficiency.

Keywords: pineapple fiber, air drying, sun drying, relative humidity, moisture content, temperature and solar radiation.

Acreditación

Esta tesis fue aceptada por el Tribunal Evaluador de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica y aprobada por el mismo como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura.

“Evaluación de la Eficiencia de una Secadora Solar Portátil para Biomasa, evaluada con fibra de piña, en cuatro sitios de Costa Rica”

Miembros del Tribunal Evaluador

Róger Moya Roque, Ph. D.

Director de Tesis

Cynthia Salas Garita, Msc.

Escuela de Ingeniería Forestal (lectora)

Carolina Tenorio Monge, Lic.

Escuela de Ingeniería Forestal (lectora)

Marco Antonio Solano Mata

Estudiante

Dedicatoria

Le dedico mi trabajo y esfuerzo a:

Dios y a la Virgen María, que siempre me iluminaron y me dieron la fuerza para seguir adelante.

Y desde luego a mi Padre Marco, mi Madre Miriam, mis dos Hermanas Jennifer, Hilary y mis dos abuelitos que partieron de este mundo, personas de las de las que me enorgullezco de todo corazón.

Agradecimientos

Agradezco a Dios y a la Virgen María por darme la oportunidad de finalizar mis estudios a pesar de todos los tropiezos que da la vida. Y por darme a mi familia, las personas más valiosas que existen para mí en este mundo, mi Papá, mi Mamá y mis dos hermanas que me han ayudado con todo lo que pudieron, tanto material, espiritual, y emocional. Que siempre han estado a mi lado en las buenas y en las malas, dándome su cariño y de los cuales me siento muy orgulloso.

A mis tíos Aníbal, Mauricio, Leonel, Álvaro y Marisol, que me ayudaron en momentos muy duros y creyeron en mí y mis capacidades para salir adelante, ya que sin su ayuda no hubiera podido llegar tan largo.

De manera especial a Róger Moya, mi profesor tutor al que he molestado por mucho tiempo a todas horas con preguntas y con mi actitud que en ocasiones es dura de soportar, que me ha enseñado a valorar mi trabajo como persona y como profesional, al cual admiro por su humildad y capacidades. A la profe Cynthia Salas que me dio esperanzas cuando las había perdido y por sus consejos. A Carol Tenorio por ayudarme y escuchar todas mis quejas y reírse de ellas cuando más lo necesitaba. Desde luego a Rodrigo Viquez que trabajo mucho y que estuvo llevando sol conmigo y con Moya, haciendo del trabajo algo mucho más divertido y a todos los funcionarios del CIIBI y otros departamentos del TEC que de una u otra forma me ayudaron a hacer posible este trabajo.

Mis amigos Luis Carlos y Andrés que los conozco desde siempre y han estado ahí apoyándome desde hace muchos años.

Y no menos importante, a mis compañeros de carrera: Michael, Daniel, Guillermo, Esaú, Juan Carlos, Danilo, Manolo, Alejandra, Monse, María, Elsa, Carmen y muchos otros con los que he compartido los últimos años de mi vida, en toda clase de situaciones, en los cursos, en las giras, en los trabajos, en los exámenes, en las fiestas y en momentos difíciles. De los cuales me llevo grandes recuerdos y que sin ellos no hubiera soportado el peso de la carga. Y me voy con la satisfacción y el orgullo de poder llamar a algunos de ellos mis amigos.

Índice General

Resumen	i
Abstract	ii
Dedicatoria	iv
Índice de Figuras	viii
Introducción	10
Materiales y métodos	13
Propuesta de la Secadora Solar Portátil	13
Concepto y origen	13
Estructura y descripción	13
Paredes:	14
Techo:	15
Base y piso:	16
Puertas:	17
Ensamblaje de la secadora	18
Evaluación de la eficiencia de la secadora	21
Sitios de estudio y condiciones físicas para el secado	21
Condiciones de ensayo dentro de la secadora en cada sitio	22
Rio Cuarto	22
Guácimo y Buenos Aires	22
Cartago	22
Sistema de inyección de calor	23
Material a secar	24
Muestreo y período de evaluación durante el día	24
Colocación del material dentro y fuera de la cámara	25
Equipo utilizado para la medición de la temperatura, humedad relativa y radiación dentro y fuera de la cámara	25
Control de humedad	26
Cálculo de los tiempos de secado	26
Análisis estadístico	27

Resultados	27
Condiciones de temperatura, humedad relativa y radiación externa e interna a la cámara de secado.	27
Evaluación de la radiación solar	28
Evaluación de las condiciones de humedad relativa interna y externa.....	30
Evaluación de las condiciones de temperatura interna.....	33
Contenido de humedad promedio (CH) y tiempos de secado.....	39
Variación del Contenido de humedad con el tiempo de secado.....	43
Análisis de resultados	46
Condiciones ambientales de la cámara.....	46
Contenido de humedad promedio (CH) y tiempos de secado.....	49
Conclusiones	51
Recomendaciones	53
Bibliografía	53

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Condiciones climáticas generales y particulares para cada sitio de estudio.....	28
Cuadro 2. Contenido de humedad inicial (CHI) y final (CHF) y tiempo de secado de fibra de piña en secado solar y al aire según hora del día en diferentes zonas de Costa Rica.....	40

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama general de la secadora solar portátil, (a) parte trasera, (b) parte delantera, (c) extremo derecho y (d) extremo izquierdo.	14
Figura 2. Diagrama de las paredes de la secadora. (a y b) parte interna de las paredes (a y c) pared que contiene las ventanas, (d) parte externa y (e) vista lateral y grosor de las paredes.	15
Figura 3. Diagrama del techo, sus dimensiones y esquema de plegado.....	16
Figura 4. Diagrama de la base y piso de la estructura. (a) piso de madera fabricado en dos secciones, (b) base de madera y (c) vista de las dos partes unidas.....	17
Figura 5. Diagrama de las puertas de la secadora. (a) parte lateral derecha sin puerta, (b) armazón de madera, (c) puerta terminada y (d) puerta colocada en la secadora.	18
Figura 6. Diagrama de ensamblado de la secadora portátil. (a) paredes, (b) secciones conectoras, (c) techo (e) piso, (f) base del piso, (d) tornillos, y (g) grada formada entre la base y el suelo.....	19
Figura 7. Diagrama de la parte interna de la secadora (a) colector solar, (b) puertas, (c) abanicos, (d) angulares metálicos, (e) bafle y (f) deshumidificador.....	20
Figura 8. Esquema del sistema de inyección de calor, (a) caja del quemador, (b) turbina de inyección, (c) tubería y (d) acoples metálicos.	23
Figura 9. Esquema de la máquina para la extracción de la fibra y una fotografía de la misma en el campo.	24
Figura 10. Colocación de las muestras de fibra de piña, (a) dentro de la secado, (b) al aire libre.....	25
Figura 11. Radiación solar directa e indirecta para los cuatro sitios donde se realizaron las pruebas en diferentes horas del día.....	29
Figura 12. Humedad relativa interna de los 4 sitios estudiados a diferentes horas del día.....	30
Figura 13. Humedad relativa interna y externa para cada uno de los sitios de estudio para diferentes horas del día.....	32

Figura 14. Temperatura interna en cada uno de los sitios de pruebas en diferentes horas del día.....	33
Figura 15. Temperatura interna y externa de los cuatros sitios de estudio en diferentes horas del día..	35
Figura 16. Radiación solar directa e indirecta con respecto al cambio de la temperatura interna y externa de cada sitio de pruebas.	37
Figura 17. Relación existente entre la temperatura interna y externa en cada uno de los sitios analizados	38
Figura 18. Tiempos de secado en base a un 15% de contenido de humedad a diferentes horas del día para cada sitio de pruebas.....	42
Figura 19. Contenido de humedad de los cuatro sitios en secado solar.	43
Figura 20. Contenido de humedad según secado solar (derecha) y al aire (izquierda) por hora para cada uno de los sitios.	45

Introducción

Actualmente en el mundo la demanda por recursos energéticos va en aumento, las personas dependen de la producción y el uso de la energía. Se prevé que en los próximos 50 años, la demanda de energía aumentará al doble de la que consumimos en la actualidad (Spitalnik, 2004). Ante ello es fundamental la utilización y optimización de energías renovables para llevar a cabo los procesos productivos. Es bien conocido que las fuentes energéticas actuales provienen de combustibles fósiles, los cuales contaminan y amenazan el medio ambiente, degradan la capa de ozono y conducen a un mayor calentamiento global (Lotfalian et., 2010). Ante tal panorama la energía solar se presenta como una alternativa de gran interés por sus cualidades y características de ser limpia, de gran potencial y alta disposición (Machado et al., 2010 y Souza, 2007).

Costa Rica es un país de clima tropical ubicado entre el Trópico de Cáncer y Capricornio (IMN, 2009), con una extensión de 51 100 km² (MOP, 2005). Recientemente en el país se ha generado un interés por la obtención y mejora de diversos productos de origen orgánico (biomasa) y por el aprovechamiento de las 11764 toneladas de residuos agroindustriales que se producen diariamente (Ulloa et al., 2003). Para lograr esto se necesita la creación de paquetes tecnológicos que ayuden a maximizar sus recursos. En una eficiente utilización de los recursos orgánicos es necesario contar con procesos de secado (estos materiales o recursos se caracterizan por la presencia de humedad) para la obtención de materia prima adecuada o dar valor agregado a los productos. La esencia básica del secado es reducir el contenido de humedad del producto a un nivel que impida el deterioro dentro de un cierto período de tiempo (Ekechukwu y Norton, 1999) lo cual lo convierte en una técnica para la conservación de productos alimenticios (Okala et al., 2011).

Tradicionalmente el secado en Costa Rica se ha realizado mediante el uso de hornos convencionales que funcionan con electricidad o a partir de la combustión de gas, petróleo o madera (Costales, 2010). Pero este sistema sólo está disponible en muy pocas industrias, debido al alto costo de inversión y de operación, a la poca disponibilidad de mano de obra

calificada y complejos sistemas de control de humedad. Por lo cual el más utilizado es el secado al aire libre, con la gran desventaja de que logra bajar los contenidos de humedad entre 18 y 24%, dependiendo de la región geográfica donde se realice el proceso de secado (Salas et al., 2008).

Recientemente el desarrollo de secadoras con uso de la energía solar ha ganado mucha popularidad (Ekechukwu y Norton, 1999) ya que ofrece una alternativa ecológica para un gran número de productos agrícolas en cuanto al proceso de secado. La energía solar presenta un doble rol, es un desintoxicante para el planeta, a la vez que posee un elevado potencial para resolver muchos aspectos de la vida cotidiana con respecto a la disponibilidad de recursos energéticos (Costales, 2010). Existen muchos ejemplos de la utilización del secado solar como por ejemplo en la madera (Salas et al., 1999; Benítez, 1993) y en gran variedad de productos de consumo alimenticio como el cacao y el coco (Eddy et al, 1991), el arroz con cáscara (Bala et al., 1994]), el tomate (Zhimin, 2006), el limón y la naranja (Lotfalian et al., 2010), las uvas secas (Dadashzadeh, 2006), las hierbas y especias (Janjai et al., 2006), las frutas y verduras (Gallali et al., 2000) y muchos otros alimentos. En donde se ha llegado a demostrar que el color y el aroma de estos productos secos mediante el uso de este tipo de secadora presenta ventajas en comparación de los métodos tradicionales de secado (Lotfalian et al., 2010). Todo esto ha llevado a incentivar la introducción de sistemas de secado solar como una alternativa muy prometedora para reducir los períodos de secado de productos y evitar pérdidas (Muhlbauer et al., 1993).

Sin embargo, una desventaja de las secadoras solares es su dependencia a la radiación solar y la variabilidad de las condiciones ambientales durante el día y específicamente la presencia o ausencia de nubes. Las nubes pueden llegar a reflejar el 70% de la radiación solar (Azhari et al., 2008), además de otros factores como la latitud del lugar, la topografía, la reflectividad del suelo, el contenido de vapor de agua y de aerosoles de la atmósfera y el día del año (Wright, 2002; Azhari et al., 2008). En las zonas donde la luz solar es abundante, el uso de secadores solares reduce el coste de la energía procedente de fuentes convencionales (Okala et al., 2011). Un ejemplo es el ocurrido en Tailandia, con clima tropical, donde en los últimos años el precio

del gas propano (GLP) ha aumentado sustancialmente, aumentando así el costo de secado, por lo cual tiene potencialidades enormes para el secado solar (Berinyuy et al., 2012)

En Costa Rica, se cuenta con un clima que varía de Tropical Seco a Tropical muy húmedo, caracterizado por temperaturas que van desde los 14 a los 27 °C (bajas temperaturas en las zonas altas, altas en las zonas bajas y en la región del Pacífico), con humedad relativa promedio del 68% y que cambia para las diferentes regiones y en las épocas del año, de 55% en marzo a 78% en octubre. Sin embargo, durante el día estas condiciones varían, en el periodo comprendido entre 1 y 8 horas de la mañana y luego de las 15 horas, la humedad ambiental puede ser superior a 90% y acentuándose esta humedad en la estación lluviosa (Alvarado, 2001). Dichas condiciones climáticas no permiten crear sistemas de secado solar eficientes, ya que en estos sistemas es necesario cambiar constantemente el aire con alta humedad relativa (HR) de la parte interna de la secadora por aire de la parte externa de preferencia con baja humedad relativa. La introducción de baja (HR) hacia la parte interna permite un secado eficiente de los materiales.

Ante la problemática de alta humedad relativa en el ambiente, la búsqueda de equipos de secado de bajo costo y la necesidad de secar la biomasa para usos posteriores es que en el presente trabajo se tiene como objetivo el diseño y evaluación de la eficiencia en campo con diferentes escenarios climáticos de una secadora solar versátil y económica como propuesta para el secado de biomasa. En dicho modelo la fuente principal de energía para el secado es la energía solar, además se utilizó dos abanicos y un deshumidificador, que funcionan con energía eléctrica (110 V-CC) y un suministro de calor a partir del quemado de gas propano para las horas donde se produce una alta HR. Siendo estas dos últimas fuentes de energía susceptibles a cambiar, la eléctrica por paneles solares y el gas propano por el generado por la biodigestión de biomasa.

Materiales y métodos.

Propuesta de la Secadora Solar Portátil

Concepto y origen

La secadora utilizada es un prototipo portátil construido y diseñado para utilizar los materiales que comúnmente se encuentran en las ferreterías de Costa Rica. Así mismo, dicha secadora puede ser transportada y ensamblada en cualquier sitio con herramientas simples. Su concepto de diseño fue con el fin de ser utilizada para satisfacer las necesidades de pequeños productores de biomasa para que de esta manera el proceso de secado de la misma sea realizado de la manera más eficiente y barata posible. Este diseño experimental fue construido por el Centro de Investigación e Integración de Bosque e Industria (CIIBI) del Instituto Tecnológico de Costa Rica y se fundamenta en el diseño de un secador solar fijo existente en el mismo Centro de Investigación, construido y diseñado según las especificaciones de Salas, Moya y Córdoba (2008). Su diseño fue propuesto para ser empleado en el secado de diversos tipos de biomasa, utilizando la energía del sol para calentar un colector solar en la parte superior y luego hacer circular el aire dentro de la cámara.

Estructura y descripción

La secadora portátil está conformada por dos paredes, cuatro puertas, un techo plegable, una base y piso de madera, una lona que funciona como bafle y un colector solar metálico. Además, cuenta con dos abanicos que hacen circular el aire y en algunos casos se utiliza un deshumidificador, para disminuir la humedad relativa interna de la cámara. La Figura 1, muestra las dimensiones generales de la secadora y a continuación se describen en forma general las diferentes partes de la misma, en la Figura 7 se presenta un diagrama con la ubicación de las partes internas de la misma.

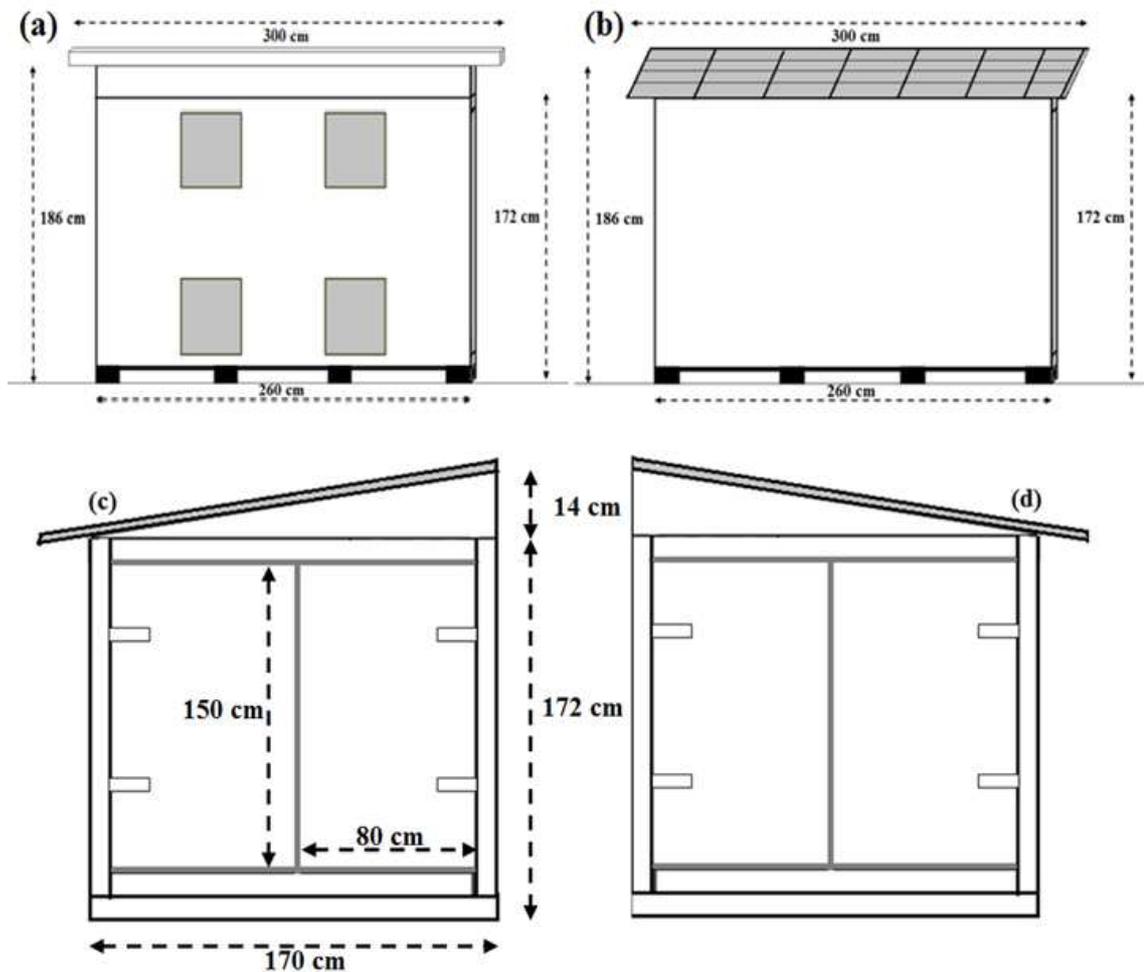


Figura 1. Diagrama general de la secadora solar portátil, (a) parte trasera, (b) parte delantera, (c) extremo derecho y (d) extremo izquierdo.

Paredes:

Están construidas a partir de tablones, madera de 5 cm x 10 cm x 400 cm, fibra de vidrio en la parte interna, láminas de zinc #32 liso en la parte exterior y tableros de tetrabrik en el interior. Las dimensiones de estas paredes son 260 cm de largo y 172 cm de alto, pero en una de ellas se construyeron cuatro ventilas (46 cm de ancho por 45,5 cm de alto) para poder controlar la cantidad de humedad dentro de la cámara (Figura 2). En dichas ventilas se instalaron sistemas

convencionales de celosías para abrir y cerrar, de policarbonato transparente. La parte interna de estas estructuras fue rellena con fibra de vidrio como aislante para maximizar la eficiencia de la secadora. El forro interno fue fabricado artesanalmente con cajas de tetrabrik de 9 mm de espesor. El forro interno de tetrabrik y las láminas de zinc de la parte externa, fueron pegados a la estructura de madera con clavos, tachuelas, y silicón para evitar las pérdidas de aire. Las paredes tienen un grosor total de 4,5 cm.

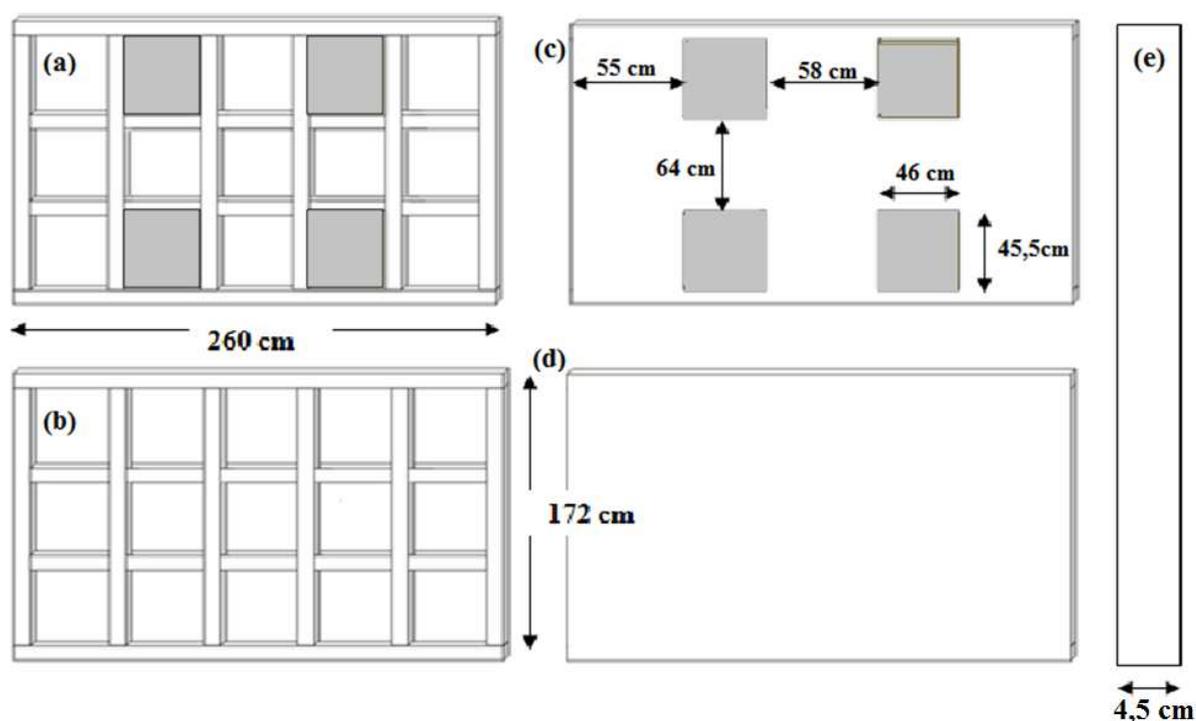


Figura 2. Diagrama de las paredes de la secadora. (a y b) parte interna de las paredes (a y c) pared que contiene las ventanas, (d) parte externa y (e) vista lateral y grosor de las paredes.

Techo:

Fue fabricado con tubos de aluminio (2,5 cm x 2,5 cm) con láminas de policarbonato de 3 mm de espesor. Se diseñó para poder plegarse en el medio con bisagras metálicas para facilitar su manipulación y transporte, así mismo se construyó la estructura con un cuadrícula (50 cm x

50 cm) para darle mayor soporte y resistencia y para evitar que las láminas se quebraran fácilmente (Figura 3). Las láminas fueron pegadas a la estructura metálica con remaches y silicón industrial para evitar fugas. Sus dimensiones son 300 cm de largo por 200 cm de ancho.

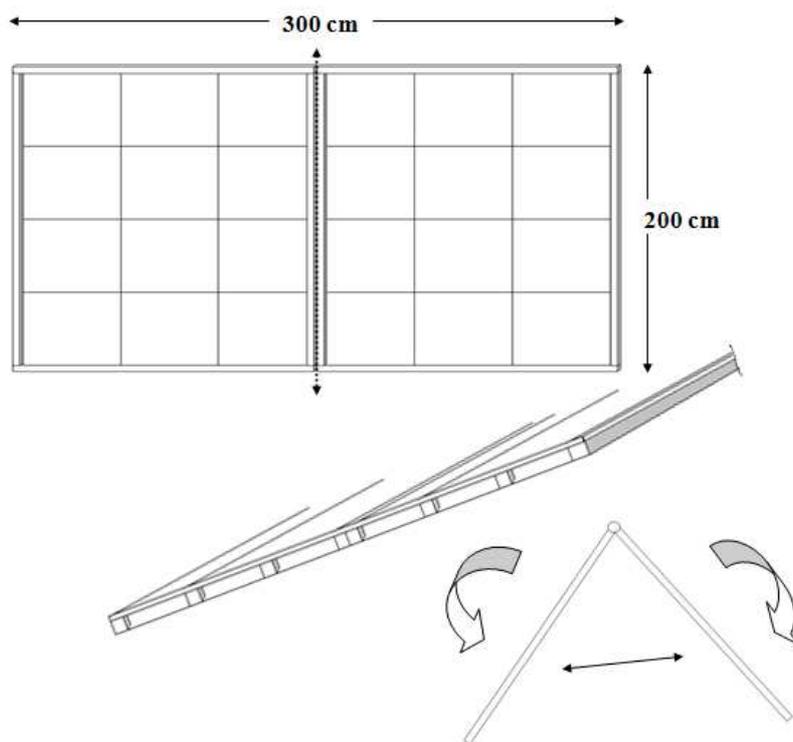


Figura 3. Diagrama del techo, sus dimensiones y esquema de plegado.

Base y piso:

Se construyó una base de madera con piezas de 5 cm x 15 cm x 480 cm, para colocar encima el piso fabricado con piezas de 5 cm x 10 cm x 400 cm y tablillas de 7,5 cm de ancho (Figura 4). La base es una sola pieza unida con clavos de 14 cm de alto por 260 cm de largo y 170 cm de ancho. El piso se fabricó en dos secciones de 80 cm de ancho y 260 cm de largo, para

facilitar su transporte y unido mediante el uso de tornillos en los extremos internos y este simplemente se encastra encima de la estructura base (Figura 4).

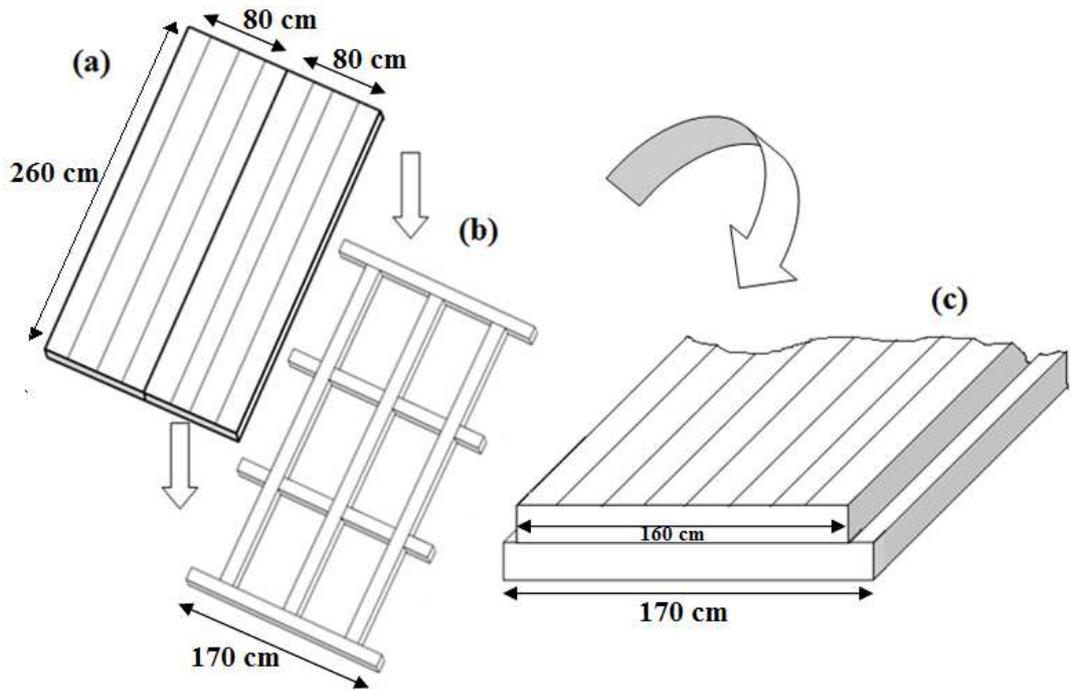


Figura 4. Diagrama de la base y piso de la estructura. (a) piso de madera fabricado en dos secciones, (b) base de madera y (c) vista de las dos partes unidas

Puertas:

Fueron fabricadas con una estructura de madera con piezas de 5 cm x 10 cm x 400 cm. Externa e internamente están forradas con láminas de zinc lisas #32 y dentro de la estructura de madera los espacios están rellenos con fibra de vidrio como material aislante del calor. Las

puertas son removibles y están unidas por medio de bisagras y tornillos a las paredes de la secadora (Figura 5).

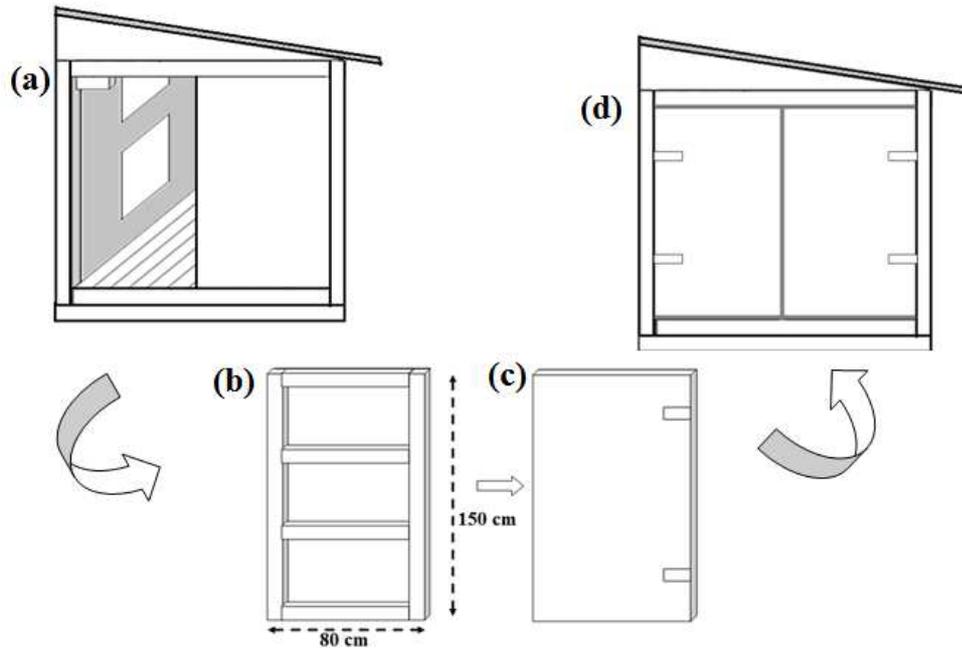


Figura 5. Diagrama de las puertas de la secadora. (a) parte lateral derecha sin puerta, (b) armazón de madera, (c) puerta terminada y (d) puerta colocada en la secadora.

Ensamblaje de la secadora

Esta secadora solar necesita de por lo menos tres personas para su ensamblado. Inicialmente se debe instalar la base de madera, la cual debe colocarse bien nivelada. Posteriormente encima de esta, se deben colocar las dos partes del piso. En una especie de grada formada entre el piso y la base de madera, se apoyan las paredes y se sujetan con tornillos a los extremos del piso (Figura 6). Con las paredes aseguradas se instalan las piezas o secciones conectoras, las cuales son las encargadas de dar la inclinación de 10° (Salas et al. 2008) y soporte adecuado al techo. Estas secciones conectoras van sujetas con tornillos a unas piezas o

cejas de madera ubicadas en las esquinas de la parte superior interna de las paredes (Figura 6). Seguidamente se colocan las bases (dos platinas de hierro) de los colectores solares y los colectores solares que deben ser colocados antes de la instalación del techo. El techo se coloca encima de la estructura y se atornilla a 4 platinas metálicas ubicadas en las paredes. Para finalizar se coloca fibra de vidrio en las aberturas entre el techo y las paredes para evitar la fuga de calor.

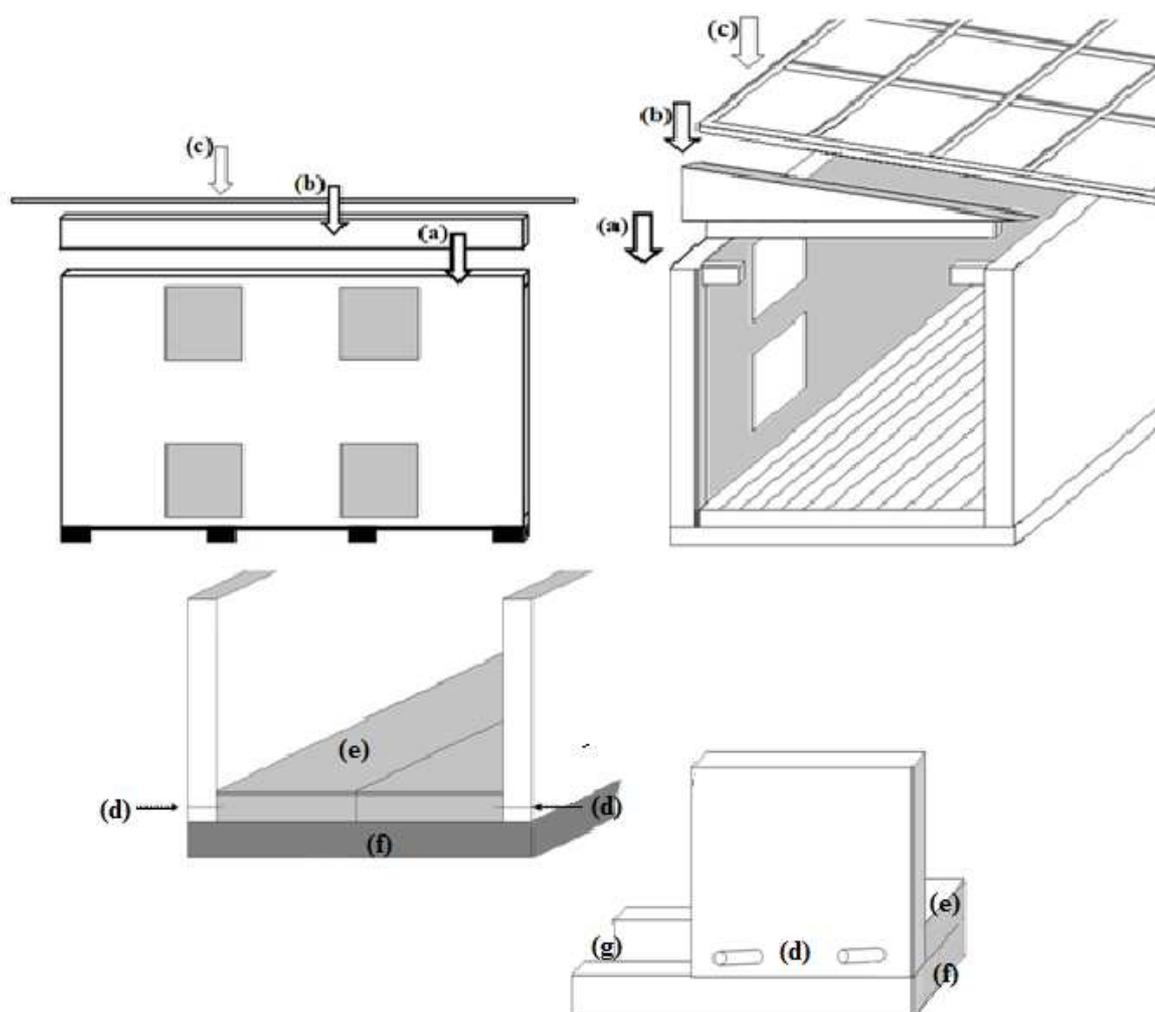


Figura 6. Diagrama de ensamblado de la secadora portátil. (a) paredes, (b) secciones conectoras, (c) techo (e) piso, (f) base del piso, (d) tornillos, y (g) grada formada entre la base y el suelo

Parte interna de la secadora

Dentro de la secadora se encuentran los colectores solares de láminas de acero de 3 mm de espesor pintadas de negro, los cuales se ubican a 30 cm del techo de la secadora. Debajo de los colectores se localiza una lona que tiene la función de bafle para re-direccionar las corrientes de aire dentro de la cámara de secado y para proteger el material que se seca de tal manera que la corriente de aire de los abanicos no le pegue directamente, este bafle se ubica a 30 cm por debajo del colector solar. Dos abanicos separados por 58,5 cm uno del otro, se encuentran cerca de las ventilas en la parte superior y estos apuntan a los colectores solares, para formar una corriente de aire dentro de la cámara de secado. El deshumidificador se coloca en el piso de la cámara de secado, es un instrumento que ayuda a controlar el contenido de humedad dentro de la secadora y puede ser opcional para el proceso (Figura 7).

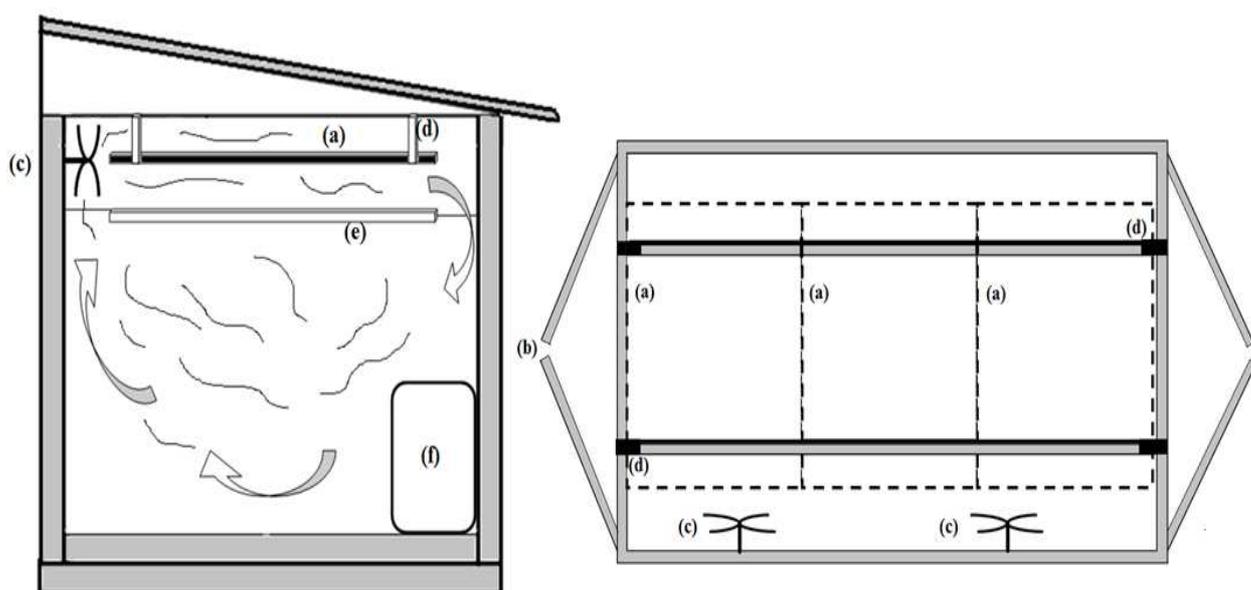


Figura 7. Diagrama de la parte interna de la secadora (a) colector solar, (b) puertas, (c) abanicos, (d) angulares metálicos, (e) bafle y (f) deshumidificador.

Evaluación de la eficiencia de la secadora

Para la validación del modelo de secadora solar portátil se realizaron cuatro pruebas de funcionamiento en cuatro sitios de Costa Rica con diversas condiciones climáticas. La evaluación de la secadora se realizó utilizando para el secado la fibra de piña, ésta fibra se caracteriza por presentar una humedad entre 60% y 80% y es necesario secar en un tiempo menor a las 10 horas. La evaluación de la eficiencia energética se realizó considerando, en primera instancia 4 variables ambientales (temperatura, humedad relativa, radiación directa y radiación indirecta) y en segunda instancia las condiciones de temperatura y humedad relativa dentro de la cámara. En cada una de estas pruebas se realizaron mediciones en diferentes intervalos de tiempo durante todo el periodo que tardó el secado de la fibra de piña en los diferentes sitios. Así mismo para evaluar la eficiencia de la secadora, fue llevado a cabo un secado al natural o al aire del material utilizado, de la misma procedencia y en las mismas condiciones.

Sitios de estudio y condiciones físicas para el secado

Las pruebas de secado se llevaron a cabo en cuatro sitios de Costa Rica. Las primeras se realizaron en San Rafael (10°26'09 N y 84°14'58 O) en el cantón de Río Cuarto de Grecia, provincia de Alajuela del 16 al 17 de febrero del 2012. Posterior a estas se ejecutaron pruebas en el poblado de La Perla (10°10'25 N y 83°41'10 O) en el cantón de Guácimo de la provincia de Limón los días 23 y 24 del mismo mes. Para los días 1 y 2 de marzo del 2012 se llevaron a cabo las pruebas en el poblado de Utrapez (9°12'07 N y 83°28'19 O), en el cantón de Buenos Aires, provincia de Puntarenas. Las últimas pruebas se realizaron los días 27 y 28 de abril del 2012 en la provincia de Cartago, en el núcleo sur del campus del Instituto Tecnológico de Costa Rica (9°50'59N y 83°54'37 O). En todos los sitios se buscó un sitio plano para colocar la secadora y un espacio abierto para realizar el secado natural (o al aire). La secadora se ubicó en dirección norte-sur (sección más alta-sección más baja) para lograr que los rayos solares incidieran perpendicular al colector solar, así como que el lugar fuera abierto para tener la mayor radiación solar por el mayor tiempo posible. En los sitios de Guápiles, Buenos Aires, y

Grecia, se buscó instalar la secadora lo más cerca posible de la plantación de piña y que además se contará con energía eléctrica de 110 V, disponible para el funcionamiento de los abanicos y el deshumidificador. En Cartago el material de piña fue transportado desde Guápiles.

Condiciones de ensayo dentro de la secadora en cada sitio

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la eficiencia de la secadora, hay que tener en cuenta que se utilizaron tres formas distintas de operarla, por lo que con cada una de las pruebas se evaluó una mejora en las condiciones y a continuación se detallan:

Río Cuarto

En este sitio se utilizó la primera combinación de abanicos-posición. Los abanicos se colocaron en el suelo de la cámara de secado, cerca de las ventilas inferiores, apuntando directamente a la parte inferior de la cámara de secado, no se utilizó ningún otro equipo. Las ventilas se abrieron y cerraron de acuerdo a la humedad interna de la cámara para controlarla.

Guácimo y Buenos Aires

En estos lugares se usó la segunda combinación de abanicos-posición, los abanicos se colocaron en la parte superior de la cámara de secado, justo delante de las ventilas superiores, apuntando debajo de los colectores solares pero abarcando una mínima parte de ellos, encima del bafle o lona. Además, se comenzó a utilizar un deshumidificador para controlar la humedad interna y se dejaron de abrir las ventilas con la misma regularidad que en Río Cuarto.

Cartago

Para este sitio se dieron ligeros cambios en la combinación abanicos-posición ya que los abanicos se colocaron ligeramente más arriba de manera tal que el aire expulsado se repartiara

equitativamente entre los colectores de metal y el bafle o lona. Al igual que en Guácimo y Buenos Aires se utilizó el deshumidificador para controlar la humedad relativa interna. Con respecto a las ventilas, las cuatro se dejaron de abrir completamente y las inferiores fueron selladas del todo. El mayor cambio sufrido fue la utilización de un sistema para inyectar aire caliente a partir de un quemador de gas (Figura 8), que se utilizó únicamente el primer día a partir de las 16 horas.

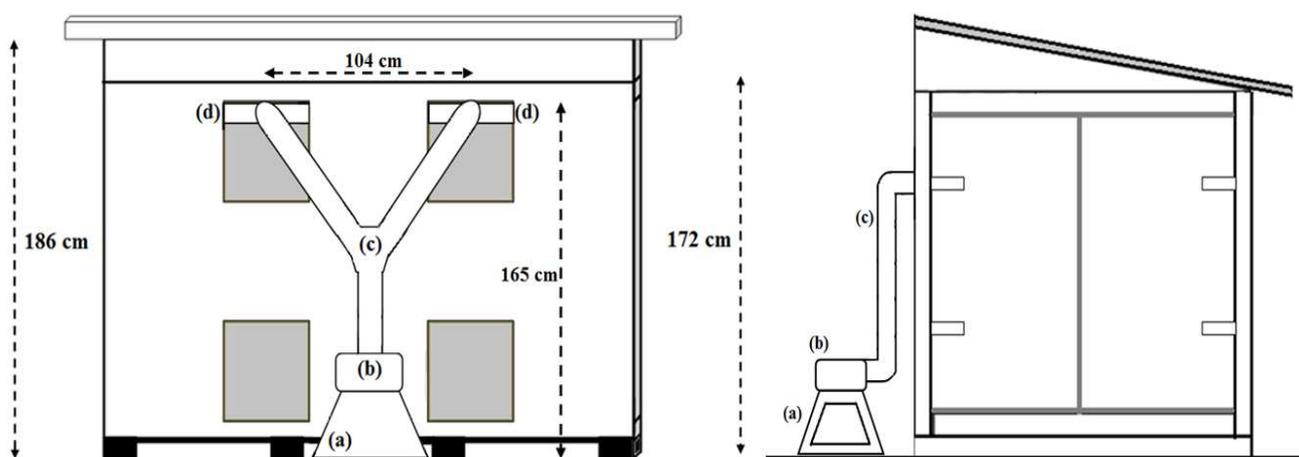


Figura 8. Esquema del sistema de inyección de calor, (a) caja del quemador, (b) turbina de inyección, (c) tubería y (d) acoplos metálicos.

Sistema de inyección de calor

El sistema está constituido por una caja metálica con ranuras regulables para la entrada de aire del exterior (Figura 8a), que contiene un quemador de gas (mechero bunsen), que calienta el aire para ser introducido a la cámara de secado. Una turbina es la responsable de extraer el aire caliente de la caja metálica, la cual funciona con corriente eléctrica (110 V CC) (Figura 8b) y una tubería metálica de zinc cilíndrica de 5 cm de diámetro forrada con fibra de vidrio y una cubierta exterior como aislante (Figura 8c) que canaliza el aire a la cámara de secado. El sistema se acopla a la secadora mediante unas placas metálicas de zinc que se sujetan a las ventilas superiores que tienen un acople para la tubería (Figura 8d).

Material a secar

Se ha mencionado que las pruebas de secado se llevaron a cabo utilizando fibra de piña extraída de las hojas de segunda cosecha de la planta de piña. Las plantas eran arrancadas de la tierra se les retiraba la raíz y el tallo, para transportar únicamente las hojas al sitio donde serían procesadas para la extracción de la fibra. La fibra fue extraída utilizando un método adaptado del procesamiento utilizado para la extracción de fibras de cabuya (Figura 9).

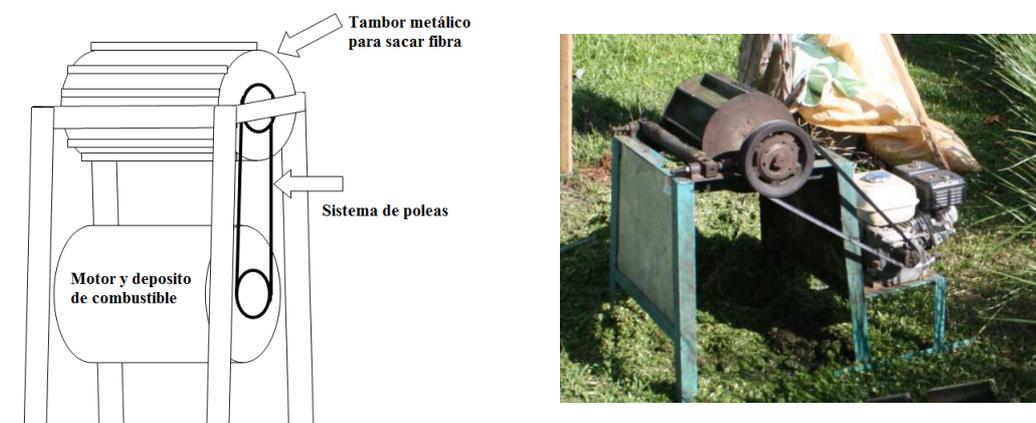


Figura 9. Esquema de la máquina para la extracción de la fibra y una fotografía de la misma en el campo.

Muestreo y período de evaluación durante el día

Durante un día de trabajo, comprendido entre las 6:00 am y las 2:00 pm, en actividades de extracción de fibra, fueron extraídas 6 muestras en promedio, en lapsos de tiempo de 1 ó 2 horas con el fin de evaluar el secado en diferentes horas del día. La muestra extraída de la producción en una determinada hora oscilaba entre los 250 y los 350 g y se dividía en dos lotes, un lote para la secadora solar y el otro para el secado al aire, que servía como testigo.

Colocación del material dentro y fuera de la cámara

El material se colocó en dos condiciones, dentro de la secadora para evaluar su eficiencia (secado solar) y su respectiva comparación, que corresponde a la parte exterior y llamado secado natural o al aire. Dentro de la cámara las muestras se acomodaron en tendederos de nylon (Figura 10a) y en el exterior en tendederos convencionales que permitieran que el material no tuviera contacto con el suelo (Figura 10b).



Figura 10. Colocación de las muestras de fibra de piña, (a) dentro de la secado, (b) al aire libre.

Equipo utilizado para la medición de la temperatura, humedad relativa y radiación dentro y fuera de la cámara

Todas las mediciones de las variables ambientales se realizaron en intervalos de tiempo de 30 minutos, durante todo el lapso que duró el proceso de secado. En las mediciones de temperatura y humedad se utilizó un higrómetro (marca Shack, modelo Cat No 63-1032) ubicado en la parte interna de la secadora, colgando a media altura de secado, de tal manera que determinara estas condiciones. Este instrumento, además de medir instantáneamente la humedad relativa y temperatura interna, permite cuantificar la temperatura externa de la

secadora con una sonda que se colocó en un sitio donde no le daban los rayos del sol directamente. En la determinación de la humedad relativa externa se utilizó una estación meteorológica portátil (marca Kestrel, modelo 3000). En la medición de la radiación solar directa e indirecta se utilizó un Piranómetro (marca Daystar's, modelo DS-05A), el cual indica cual es la radiación solar a razón de Watts por metros cuadrados. Para las mediciones de radiación directa, el instrumento fue colocado perpendicular a los rayos solares, mientras que para la radiación indirecta se colocó el instrumento en el techo de la secadora con la misma inclinación y posición que señalaba el techo hacia el cielo. Adicionalmente dentro de la secadora para su funcionamiento se utilizó un deshumidificador (marca Westpointe, modelo MDF-50AE-BAS) y un par de ventiladores de bajo consumo energético (marca Aerospeed de 20 pulgadas).

Control de humedad

Para el control de la variación del contenido de humedad (CH), todas las 6 muestras de cada lapso de tiempo, dentro y fuera de la secadora, fueron pesadas en diferentes intervalos de tiempo, que variaron de 1 a 2 horas según las condiciones ambientales, cuando la temperatura era sobre 26 °C, se pesaba cada hora, pero si era menor a esta, el intervalo de tiempo era de 2 horas. Una vez que las muestras alcanzaban su peso constante, fueron secadas a 103 °C por 24 horas para obtener el peso libre de agua. La determinación del CH en cada lapso de tiempo que se pesaron las muestras, se calculó utilizando como referencia la base húmeda, acorde con la siguiente fórmula.

$$\% \text{ Contenido de Humedad} = \frac{\text{Peso Verde (g)} - \text{Peso Seco al Horno(g)}}{\text{Peso Verde (g)}} * 100$$

Cálculo de los tiempos de secado

Para poder estimar el tiempo de secado de las diferentes muestras colocadas en los cuatro sitios analizados, se consideraron dos aspectos, el tiempo total de secado, que fue cuando se

estabilizó el peso en el campo cuando se estaban realizando las mediciones y el tiempo al 15%CH, que fue el tiempo necesario para alcanzar ese CH.

Análisis estadístico

Para efectos de este trabajo se realizó un estudio descriptivo de las diferentes variables estudiadas. Se analizaron los valores máximos y mínimos, promedios, medias y desviación estándar y la no presencia de valores extremos. Así mismo se analizó que dichas variables cumplieran con las suposiciones de distribución normal y homogeneidad de la varianza. Posteriormente, se aplicó un análisis de varianza para verificar la existencia de diferencias significativas ($p < 0,01$) entre las medias del contenido de humedad inicial y final en los diferentes sitios y horas de estudio mediante la prueba de Tukey.

Resultados

Condiciones de temperatura, humedad relativa y radiación externa e interna a la cámara de secado.

En el Cuadro 1 se resume los datos de temperatura y humedad relativa internas y externas de la cámara de secado, además de la radiación solar directa e indirecta en los cuatro sitios evaluados. Del cuadro 1 se infiere que las condiciones variaron dentro de un sitio y otro, tanto en la parte interna como en la parte externa. Para las condiciones externas a la secadora, la humedad relativa externa (HRE) obtuvo un valor promedio de 71%, siendo Cartago el sitio con el índice más alto (promedio de 85%), seguido de Guácimo, Río Cuarto y Buenos Aires con valores que oscilaron de 61 a 69 %. La radiación solar directa (RSD) fue en promedio 507 W/m^2 y vario de 1175 W/m^2 en Río Cuarto como el mayor valor registrado a 4 W/m^2 en Guácimo como el menor. Buenos Aires reporto el mayor promedio con 802 W/m^2 y el menor fue de 249 W/m^2 en Cartago. La radiación solar indirecta (RSI) promedió 380 W/m^2 y varío de 1130 a 4 W/m^2 como valores extremos, ambos datos reportados para Guácimo. El mayor valor promedio lo tiene Buenos Aires con 544 W/m^2 y el menor es 238 W/m^2 en Cartago. Con respecto a la TE (temperatura externa) y la TI (temperatura Interna) Buenos Aires reporta los

mayores valores de 38°C y 51°C respectivamente y los menores valores se dieron en Cartago con 17 °C y 19°C. El promedio general fue de 27°C. Buenos Aires presenta el mayor promedio de 32 °C y Cartago con el menor de 22°C.

Cuadro 1. Condiciones climáticas generales y particulares para cada sitio de estudio.

Parte / Secadora	Variable	General	Río Cuarto	Guácimo	Buenos Aires	Cartago
Interna	Humedad Relativa (%)	49 (21,6) [92 - 10]	73 (10,3) [92 - 53]	44 (14,4) [92 - 24]	35 (16,9) [83 - 20]	34 (15,0) [83 - 10]
	Temperatura (°C)	34 (7,5) [51 - 19]	28 (2,7) [32 - 23]	34 (5,4) [43 - 19]	40 (9,3) [51 - 20]	36 (7,5) [49 - 19]
	Radiación Solar (W/m2)*	380 (317,4) [1130 - 4]	416 (280,6) [980 - 24]	410 (359,1) [1130 - 4]	544 (371,4) [984 - 5]	238 (226,0) [725 - 9]
Externa	Humedad Relativa (%)	71 (17,9) [99 - 32]	63 (15,3) [98 - 39]	69 (14,2) [92 - 44]	61 (18,5) [92 - 32]	85 (14,0) [99 - 57]
	Temperatura (°C)	27 (5,0) [38 - 17]	29 (2,1) [32 - 23]	27 (2,5) [30 - 20]	32 (6,6) [38 - 19]	22 (2,5) [26 - 17]
	Radiación Solar (W/m2)**	507 (401,1) [1220 - 4]	561 (361,7) [1175 - 48]	578 (465,2) [1220 - 4]	802 (345,3) [1053 - 5]	249 (244,0) [839 - 9]

Nota: (...) = desviación estándar, [...] = máximos y mínimos, * Indirecta y ** Directa.

Evaluación de la radiación solar

La variación durante el día de la RSD y la RSI de cada uno de los sitios se muestra en la Figura 11. En Río Cuarto y Guácimo (Figura 11a y 11b), tanto la radiación directa como la indirecta se comportaron muy similares. En algunas horas se dieron picos elevados de radiación, por ejemplo en Río Cuarto a las 11:30, 13:30 horas, 14:30 y 16:00 horas del primer

día y 8:00, 10:30 y 13:00 horas. En Buenos Aires (Figura 11c) nuevamente la RSD sigue siendo mayor a RSI, pero estas radiaciones se comportaron de forma casi homogénea con respecto al tiempo, no hubieron cambios bruscos a lo largo del día, si no que estos fueron graduales. Finalmente, en Cartago la RSD y la RSI fueron relativamente similares, durante el primer día, pero en el segundo día hubo una leve diferencia, la RSI fue menor.

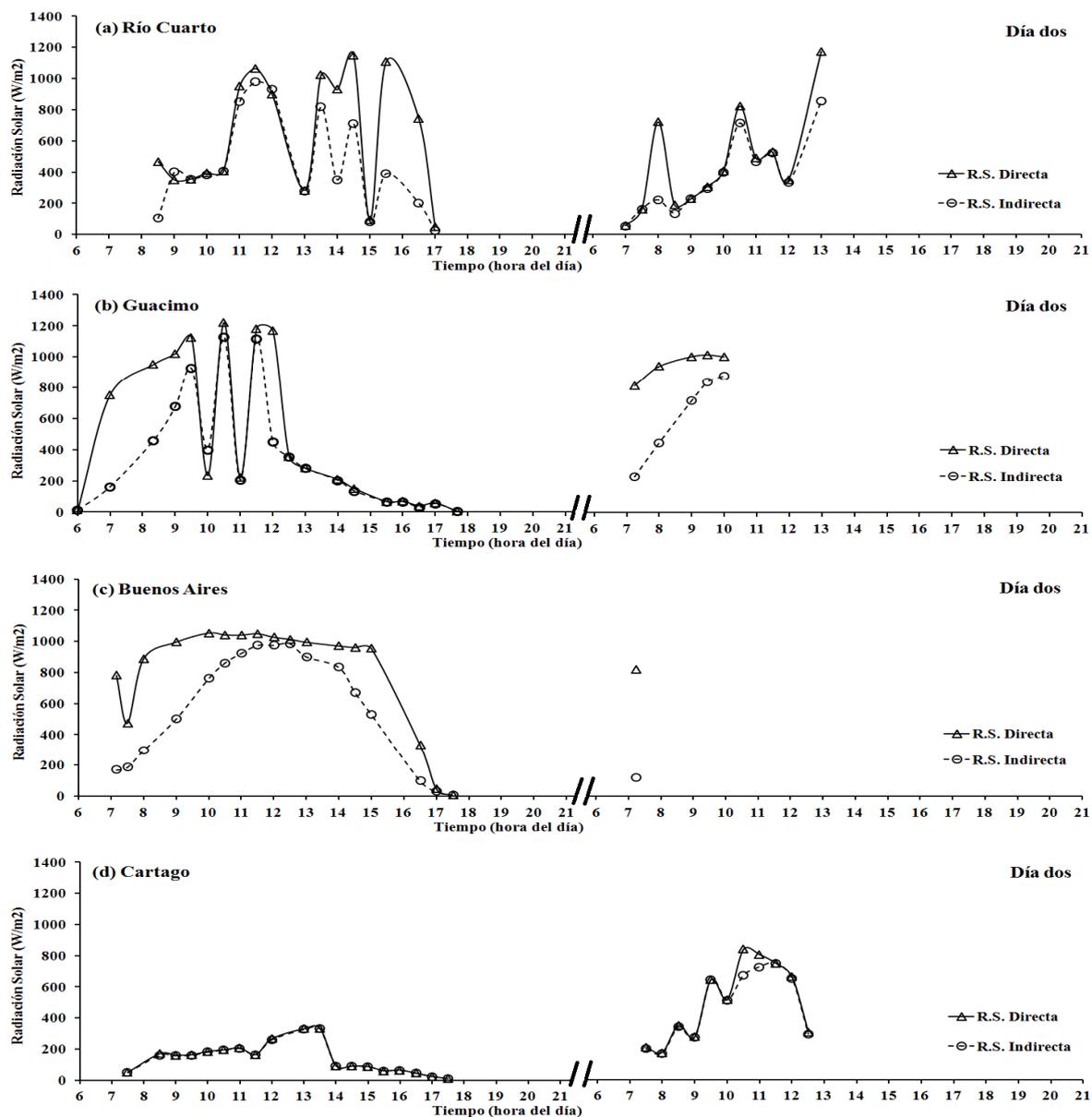


Figura 11. Radiación solar directa e indirecta para los cuatro sitios donde se realizaron las pruebas en diferentes horas del día.

Evaluación de las condiciones de humedad relativa interna y externa

Con respecto a la humedad relativa interna (HRI), en la primera prueba realizada en Río Cuarto no se utilizó el deshumidificador y los abanicos fueron colocados a nivel del piso, y dio como resultado que se tuviera los valores más altos de HRI, con un promedio de 73 %. En las pruebas donde se utilizó un deshumidificador dentro de la secadora, los valores de HRI mejoraron considerablemente el secado, con valores que variaron de 34 a 44%.

Por otro lado, la Figura 12 presenta la variación de la HRI durante el día (horas luz) en los cuatro sitios de estudio, durante la evaluación del secado. En forma general se observa que la HRI decrece rápidamente en las primeras horas de la mañana, de las 6 a 9 horas, posteriormente se mantiene entre en los niveles más bajo de HRI, para volver a aumentar a partir de las 13 o 14 horas del día, excepto en Cartago que mantiene bajo valores después de las 16 horas. No obstante, en Río Cuarto no se logró disminuir la HRI por debajo del 60%, en tanto que los sitios de Guácimo, Cartago y Buenos Aires si alcanzaron valores menores. En Buenos Aires se observan los índices más bajos que llegaron hasta el 20% de HRI. En Río Cuarto, Buenos Aires y Guácimo, que la prueba de secado continuó al segundo día, la cámara de secado en el transcurso de la noche incremento la HR. Al siguiente día se presentaron altos niveles de HRI, en especial en Río Cuarto donde no se utilizó el deshumidificador.

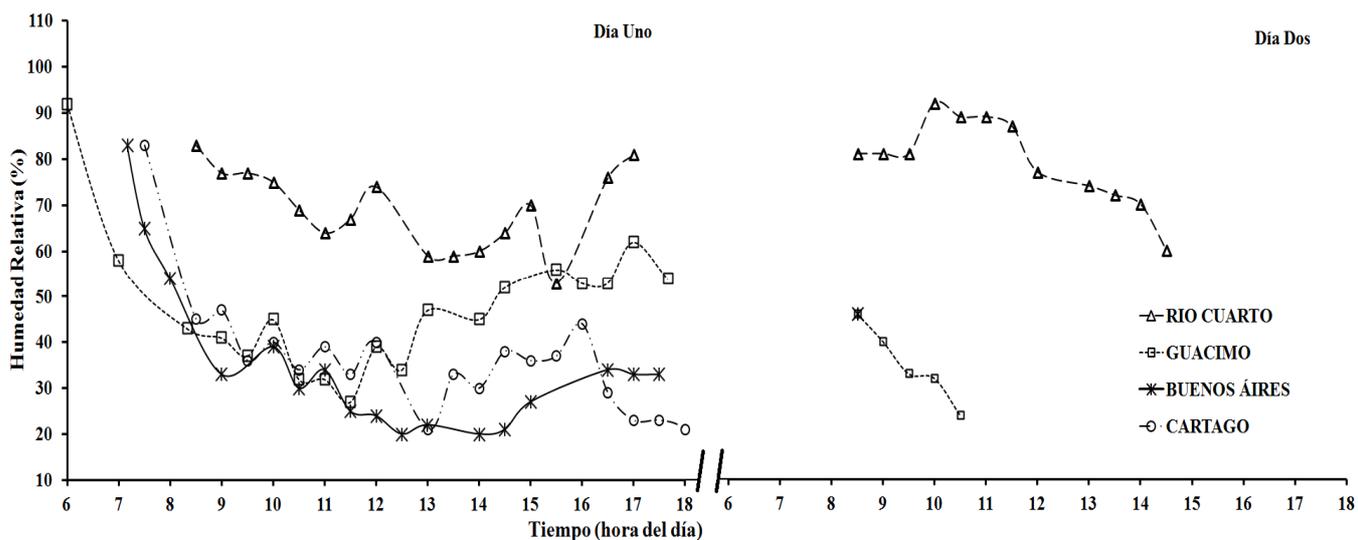


Figura 12. Humedad relativa interna de los 4 sitios estudiados a diferentes horas del día.

Al evaluar las condiciones de la HRI en relación HRE en cada sitio, se tiene que cuando no se utiliza un deshumidificador en la secadora, como en el caso de Río Cuarto (Figura 13a), la HRI es mayor a la HRE desde el inicio del secado (cerca de las 8 horas) hasta las 17 horas del primer día o las 13 horas del segundo día. Solamente a las 15 horas del primer día de secado, la HRI es más baja que la HRE. Por el contrario, los sitios donde se utilizó el deshumidificador para bajar la HRI, esta humedad siempre estuvo por debajo de la HRE, con la excepción de algunas horas en que la HRI fue similar a la HRE, por ejemplo a las 10 horas de los sitios de Buenos Aires y Guácimo (Figura 13b y 13c). Es importante también observar que las mayores diferencias entre HRI y HRE se presentaron en Cartago (Figura 13d), siempre hubo una amplia diferencia entre ambas. La HRE fue alta y se mantuvo más o menos constante durante el primer día.

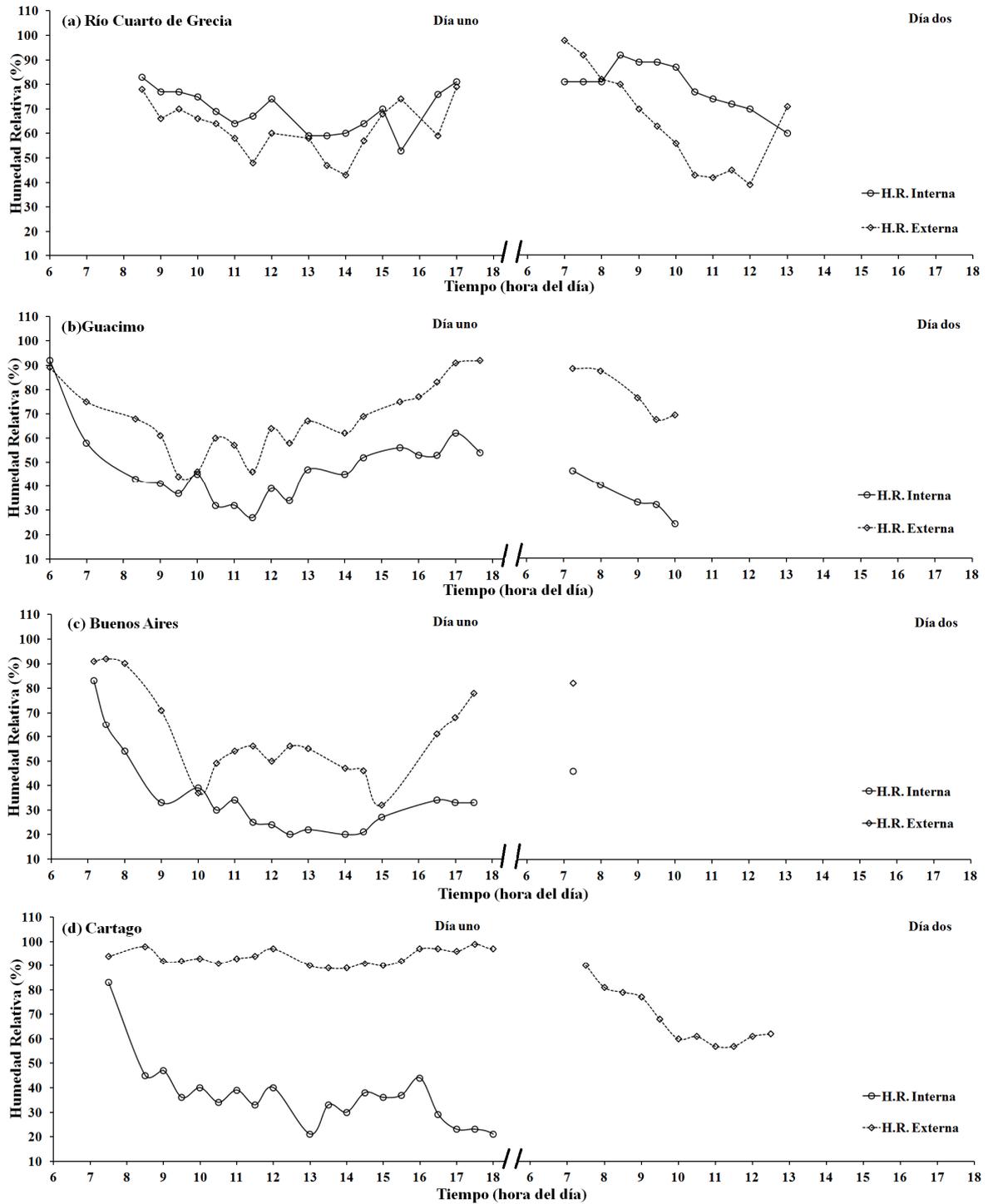


Figura 13. Humedad relativa interna y externa para cada uno de los sitios de estudio para diferentes horas del día.

Evaluación de las condiciones de temperatura interna

Durante la evaluación de la temperatura interna (TI) dentro de la secadora (Cuadro 1), se encontró que el promedio general fue de 34°C. En la Figura 14 se muestra que para los cuatro sitios en el primer día las mayores TI empezaron desde las 9 horas hasta las 13 horas. A partir de las 13 horas las TI comienzan a decaer, aunque hay algunos picos en donde vuelve a subir momentáneamente después de las 14 horas pero para volver a bajar hasta el día siguiente.

El promedio más alto se presentó en Buenos Aires y el más bajo en Río Cuarto. Para Cartago, aunque es el sitio con menor radiación y temperatura, este mantuvo una TI alta (de 36 °C), pero hay que recordar que se inyectó aire caliente en la tarde a partir de las 16 horas lo que mantuvo la temperatura más estable y continua.

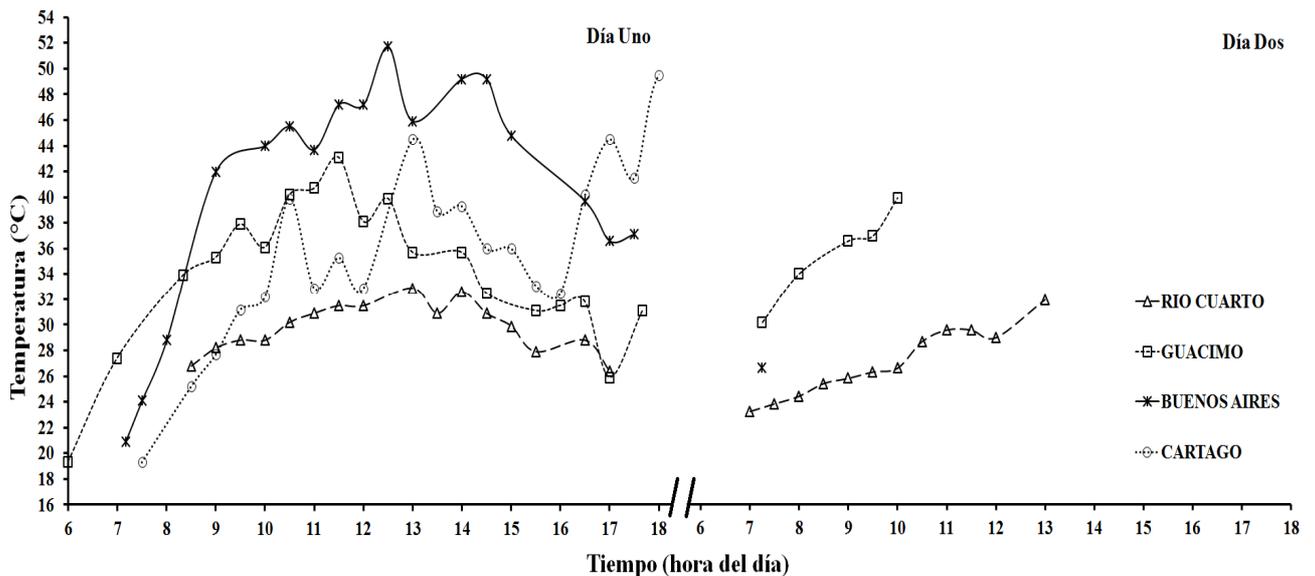


Figura 14. Temperatura interna en cada uno de los sitios de pruebas en diferentes horas del día

La comparación entre la TI y TE de cada uno de los sitios durante el día es mostrada en la Figura 15. La prueba realizada en Río Cuarto (Figura 15a) mostró un comportamiento similar entre ambas temperaturas durante el primer día, pero en el segundo día se aprecia una temperatura mayor, entre las 8 y las 12 horas para la TE. En Guácimo, y Buenos Aires (Figura 15b y 15c), ambas temperaturas tienen un comportamiento esperado, aumentan en las primeras

horas de la mañana y luego decrecen en las horas de la tarde. Así mismo la TI es mayor que la TE para los dos días de pruebas y existe una marcada diferencia entre ambas, sin embargo en Buenos Aires las diferencias de temperatura son mayores a las diferencias encontradas en Guácimo. Finalmente en Cartago se observa nuevamente un incremento de la temperatura en las horas de la mañana y luego empieza a decrecer y la TI es marcadamente mayor a la TE. Es importante hacer notar que en este sitio, con el fin de evitar el descenso de la TI dentro de la cámara de secado, como fue observado en los dos sitios anteriores, se aplicó una fuente de calor alterna y en el momento que estaba ocurriendo el descenso de la temperatura suministrada por el sol (las 16 horas). En este se observa que con el sistema de calentamiento con gas la temperatura no decae y más bien esta llega a alcanzar valores cercanos a 50 °C (Figura 15d).

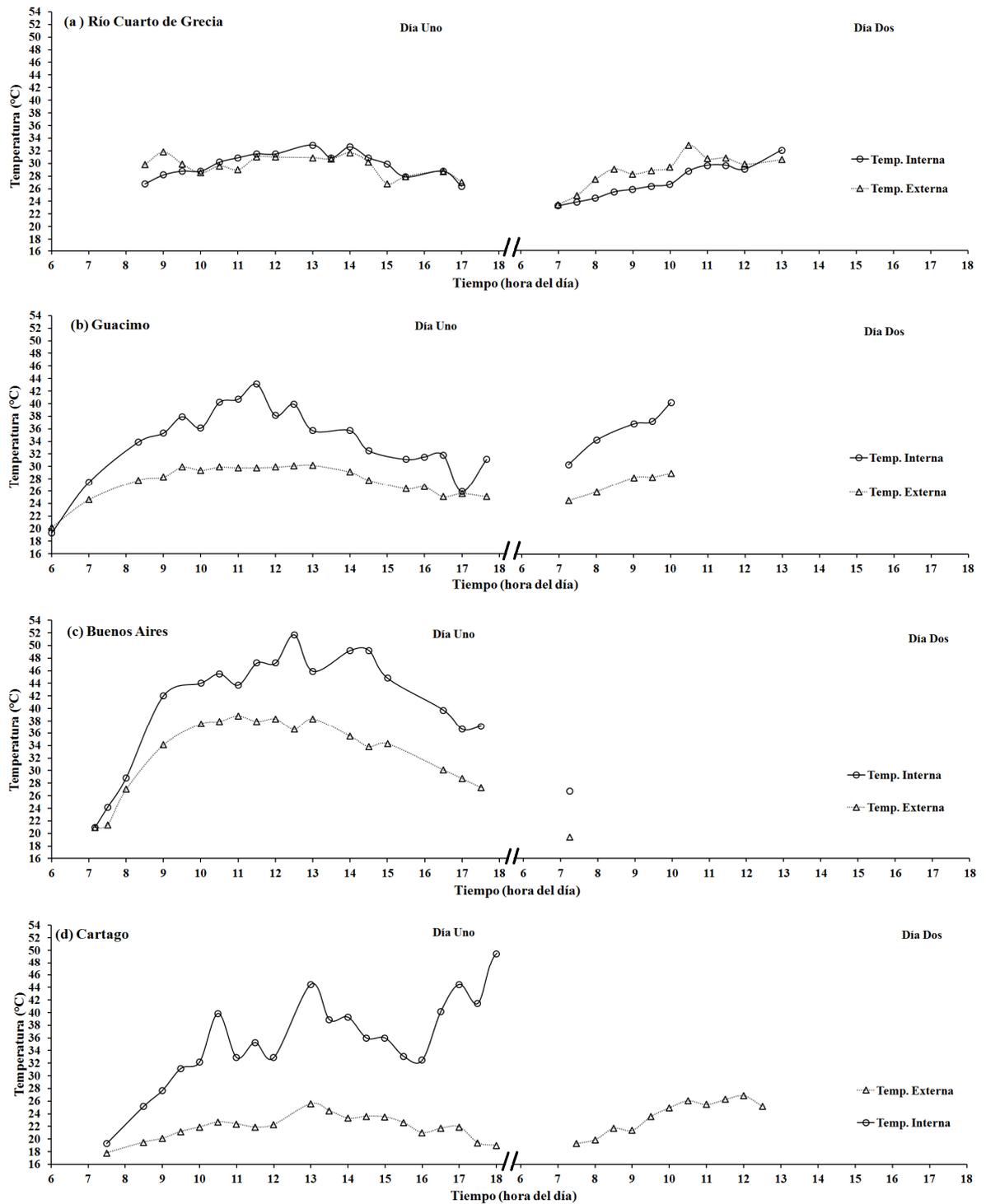


Figura 15. Temperatura interna y externa de los cuatro sitios de estudio en diferentes horas del día.

Efecto de la radiación solar sobre la temperatura interna

El efecto de la radiación como se indicó fue medido por el cambio de temperatura entre TI y TE (ΔT). En la Figura 16 se observa la relación existente entre el ΔT y los dos tipos de radiación medidas, la RSD y la RSI, para cada sitio. Para los sitios de Río Cuarto y Buenos Aires se estableció que no existe correlación entre el cambio en incremento de la temperatura dentro de la cámara y los dos tipos de RS (directa e indirecta), mostrado por su bajo coeficiente de determinación, menor a 0,14. En Guácimo se encontró un efecto significativo entre la radiación solar y el incremento de la temperatura de la parte externa a la parte interna de la cámara, y dicho efecto fue positivamente correlacionado (Figura 16c-d y 16g-h). También es importante recalcar que los menores valores de ΔT se presentaron en Río Cuarto, de -6 a 4 °C (Figura 16a y 16b), seguido de Guácimo con un cambio de 0 a 14°C (Figura 16c y 16d) y Buenos Aires de 0 a 14°C (Figura 16e y 16f) y en Cartago fue el sitio en donde se presentaron las mayores diferencias de temperatura de 2°C hasta los 18°C (Figura 16g y 16h).

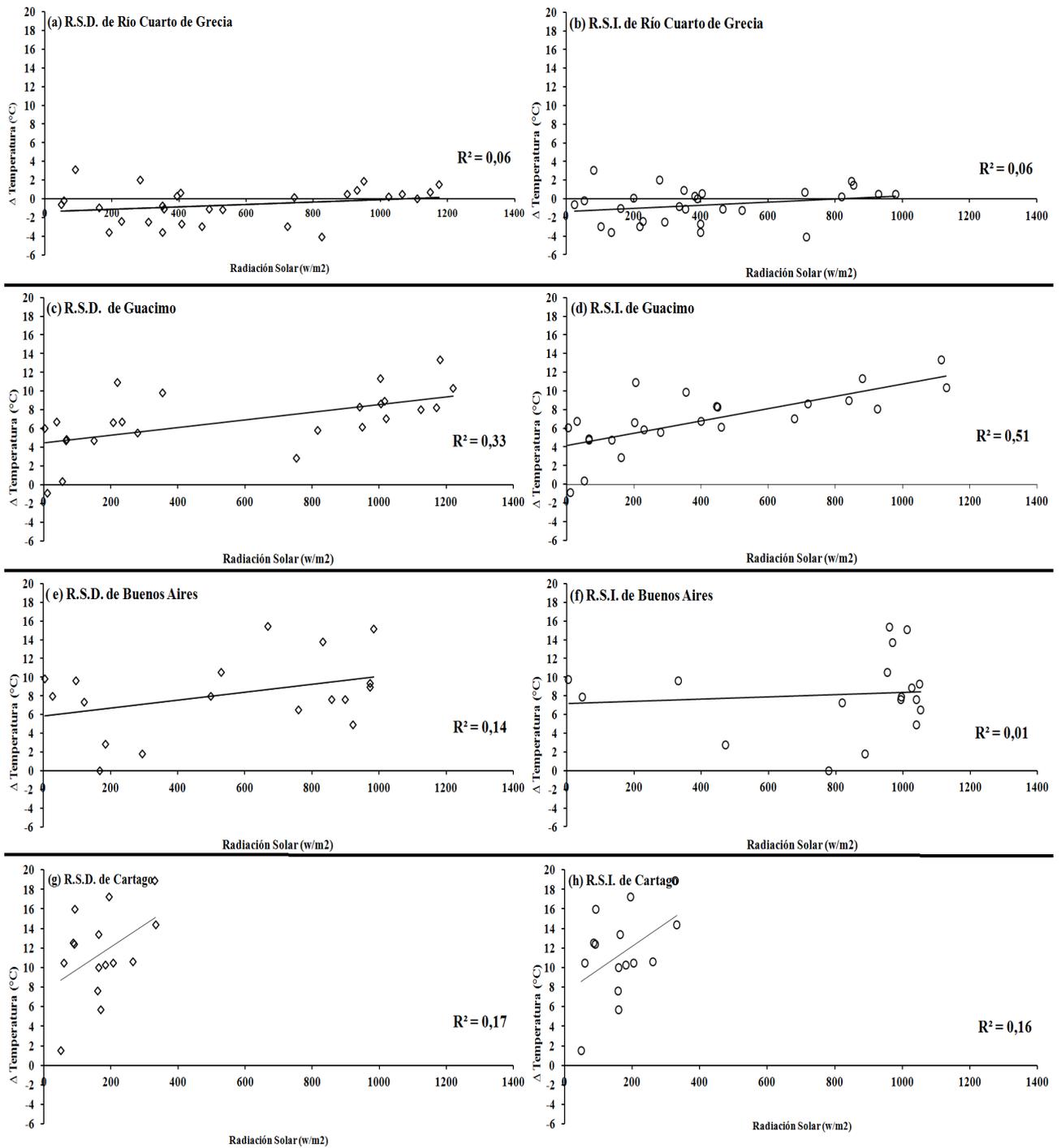


Figura 16. Radiación solar directa e indirecta con respecto al cambio de la temperatura interna y externa de cada sitio de pruebas.

Efecto de temperatura externa sobre la temperatura interna

La figura 17 muestra la correlación de la TI con la TE para cada uno de los sitios. En Río Cuarto, Guácimo, Cartago y Buenos Aires, se encontró una correlación positivamente significativa entre la TE y la TI, por tanto un incremento en la temperatura externa de la cámara trae consigo un incremento en la temperatura interna (Figura 17a y 17d).

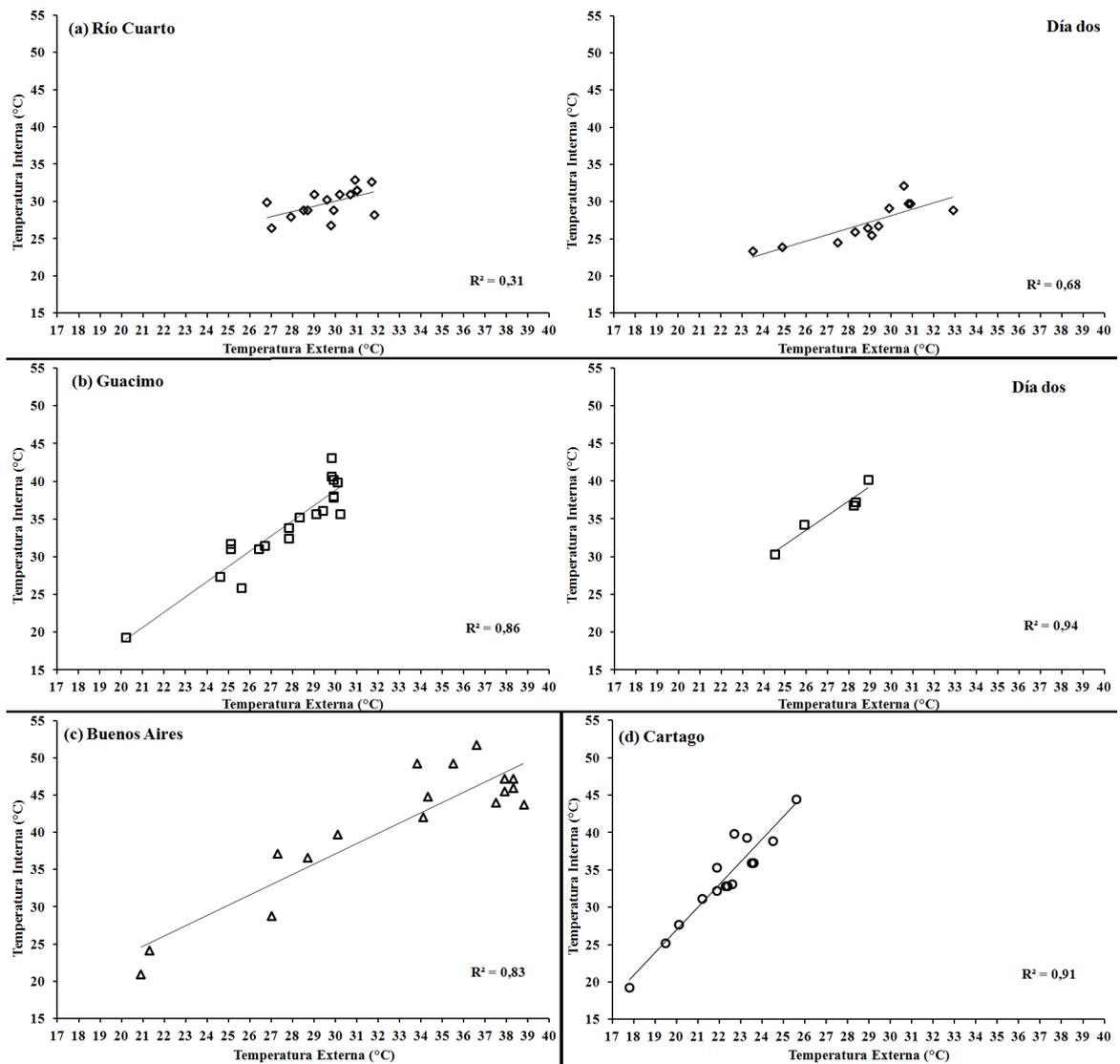


Figura 17. Relación existente entre la temperatura interna y externa en cada uno de los sitios analizados

Pruebas de secado en fibra de piña

Contenido de humedad promedio (CH) y tiempos de secado

En el cuadro 2 aparecen los promedios de CH iniciales y finales para cada uno de los sitios, según la hora de colocación de la fibra de piña en la secadora solar y la duración en horas para llegar a un CH y la estabilidad. En relación al CH inicial los valores variaron entre 70% y 77%. Para todos los casos se encontró que las muestras colocadas dentro de la secadora, como fueron los valores de CH inicial son estadísticamente iguales (valor $p > 0,05$), excepto para las 9:30 horas de Buenos Aires, en donde estos son estadísticamente diferentes (valor $p < 0,05$).

En relación al CH final de la fibra alcanzado dentro de la secadora solar, este fue diferente en cada sitio y relativamente estable con la hora de la colocación de las muestras dentro de la cámara. El menor promedio de CH final se presentó en Cartago con de 4,93% y el de mayor promedio de CH en Río Cuarto con 30,35%. Los sitios de Buenos Aires y Guácimo con 10,34% y 11, 27% respectivamente (Cuadro 2). En tanto que para las diferentes horas de colocación de fibra dentro de la cámara, no se presentó ninguna tendencia, por ejemplo en Cartago, colocar las muestras antes de la 9:30 de la mañana tiene una ligera diferencia positiva que cuando se colocan en las horas de la tarde (Cuadro 2), lo mismo sucede para Buenos Aires. Pero en los sitios restantes no se observa esa tendencia, ya que se obtienen CH finales muy variados.

Cuadro 2. Contenido de humedad inicial (CHI) y final (CHF) y tiempo de secado de fibra de piña en secado solar y al aire según hora del día en diferentes zonas de Costa Rica

Sitio	CHI (%)		CHF (%)		T / secado* (h)		T/ secado** (h)		
	Hora/Día	Solar	Aire	Solar	Aire	Solar	Aire	Solar	Aire
Buenos Aires	07:00	77,47 ^A	74,67 ^A	9,32 ^A	7,48 ^A	4:56 ^B	5:32 ^A	4:35 ^A	3:50 ^A
	08:00	76,59 ^A	75,20 ^A	8,00 ^A	9,62 ^A	4:11 ^A	3:32 ^A	4:30 ^A	3:15 ^B
	09:30	73,78 ^A	70,36 ^B	8,93 ^A	8,94 ^A	4:11 ^A	2:20 ^B	5:00 ^A	2:40 ^B
	10:30	73,24 ^A	72,93 ^A	13,17 ^A	9,38 ^A	4:23 ^A	1:16 ^B	4:00 ^A	2:00 ^B
	12:30	70,78 ^A	73,23 ^A	8,95 ^B	31,87 ^A	6:40 ^A	2:02 ^A	4:35 ^A	2:00 ^B
	14:30	74,55 ^A	73,25 ^A	13,67 ^B	30,61 ^A	5:38 ^A	3:25 ^A	2:52 ^A	2:00 ^B
Promedio	74,40^(2,41)	73,27^(1,69)	10,34^(2,43)	16,32^(11,59)	4:59^(0:59)	3:01^(1:30)	4:15^(0:45)	2:37^(0:46)	
Guácimo	06:00	72,63 ^A	73,86 ^A	11,81 ^A	13,59 ^A	6:07 ^A	6:53 ^A	5:45 ^A	4:30 ^B
	07:00	74,14 ^A	75,84 ^A	15,16 ^A	20,36 ^A	7:28 ^A	6:45 ^A	6:00 ^A	4:02 ^B
	09:30	73,41 ^A	74,80 ^A	14,49 ^B	25,36 ^A	7:37 ^B	16:45 ^A	6:30 ^A	4:45 ^B
	11:30	74,68 ^A	74,10 ^A	8,12 ^B	13,96 ^A	11:20 ^B	21:41 ^A	6:05 ^A	3:45 ^B
	14:00	72,76 ^A	74,22 ^A	6,76 ^B	15,25 ^A	15:35 ^B	19:21 ^A	17:30 ^A	3:40 ^B
Promedio	73,52^(0,88)	74,56^(0,79)	11,27^(3,74)	17,70^(5,07)	9:37^(3:51)	14:17^(7:02)	5:17^(0:24)	28:08^(1:58)	
Cartago	07:30	74,08 ^A	74,30 ^A	5,26 ^B	12,96 ^A	3:41 ^B	27:00 ^A	5:30 ^B	28:00 ^A
	08:30	72,24 ^A	73,94 ^A	3,26 ^B	8,91 ^A	3:40 ^B	26:01 ^A	5:10 ^B	27:00 ^A
	09:30	75,05 ^A	74,25 ^A	4,91 ^B	12,14 ^A	3:36 ^B	25:30 ^A	4:50 ^B	26:00 ^A
	10:30	72,92 ^A	76,33 ^A	3,76 ^B	13,01 ^A	3:03 ^B	24:48 ^A	5:00 ^B	25:00 ^A
	11:30	74,80 ^A	74,14 ^A	4,91 ^B	12,22 ^A	3:56 ^B	23:53 ^A	5:30 ^B	24:00 ^A
	13:00	75,32 ^A	73,36 ^A	6,92 ^B	10,80 ^A	4:43 ^B	22:26 ^A	6:00 ^B	23:30 ^A
	14:00	75,26 ^A	76,32 ^A	5,47 ^B	16,81 ^A	3:33 ^B	23:11 ^A	5:00 ^B	22:30 ^A
Promedio	74,24^(1,22)	74,66^(1,18)	4,93^(1,19)	12,41^(2,41)	3:44^(0:30)	24:41^(1:37)	8:22^(5:06)	4:08^(0:28)	
Río Cuarto	06:00	75,19	-	37,98	-	9:33	-	6:00	-
	07:00	76,00	-	47,04	-	9:07	-	6:00	-
	08:00	73,03	-	35,68	-	7:37	-	6:05	-
	10:00	74,49	-	28,76	-	8:28	-	4:30	-
	11:00	71,95	-	30,49	-	8:25	-	5:00	-
	12:00	72,50	-	20,76	-	25:32	-	6:00	-
	13:00	73,98	-	20,37	-	25:18	-	5:00	-
	14:00	74,52	-	21,75	-	24:08	-	4:00	-
Promedio	73,96^(1,38)	-	30,35^(9,51)	-	14:46^(8:29)	-	5:19^(0:48)	-	
Promedio General	74,05^(1,51)	74,17^(1,38)	15,22^(11,87)	15,18^(7,29)	8:33^(6:42)	14:34^(10:07)	5:39^(2:33)	11:48^(11:02)	

Nota: (...) desviación estándar. * Tiempos de secado para un 15 %CH. **Tiempos de secado cuando se llego a estabilizar el %CH.

El tiempo general de secado (15% CH) en promedio fue de 8 horas y 33 minutos. Cartago fue el sitio con el menor tiempo de 3 horas y 44 minutos, seguido de Buenos Aires con un promedio de 4 horas y 59 minutos y Guácimo con 9 horas y 37 minutos. Finalmente el tiempo de secado más extenso se obtuvo en Río Cuarto con 14 horas y 46 minutos. Por otro lado, cuando se colocaron las fibras a secar dentro de la cámara antes de las 12 horas del día, en todos los sitios se presentaron los tiempos de secado más bajos. Pero si la fibra se coloca luego de esa hora, el tiempo puede prolongarse de 1 a 5 horas (Cuadro 2). La figura 8 muestra los diferentes tiempos de secado dentro de la secadora en las diferentes horas del día hasta alcanzar un 15 % de contenido de humedad. En Buenos Aires (Figura 18a), Guácimo (Figura 18b) y Río Cuarto (Figura 18c) el tiempo de secado de las fibras es relativamente constante entre las 7 y 12 horas, pero si las muestra se colocan luego de esta hora el tiempo de secado tiende a aumentar. Excepto en Cartago que el tiempo de secado fue relativa constante durante las diferentes horas.

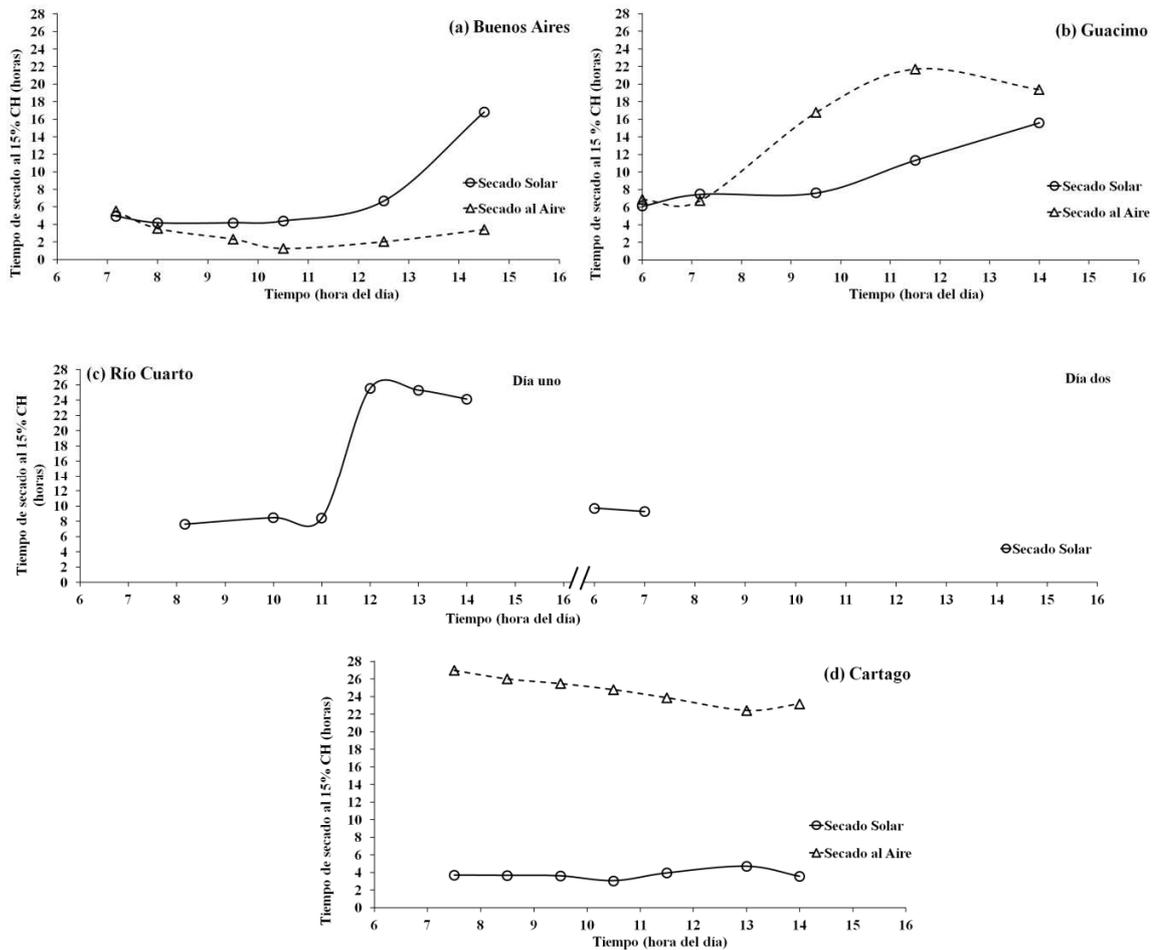


Figura 18. Tiempos de secado en base a un 15% de contenido de humedad a diferentes horas del día para cada sitio de pruebas.

Al comparar los resultados para el secado solar y el secado al aire o natural se obtiene que los valores de CHF y el tiempo de secado, tienen relación con el sitio y la hora de colocación de las muestras. En Buenos Aires y Guácimo, las fibra de piña que se colocan en la cámara de secado solar al final del proceso resultan con un CHF estadísticamente igual (valor $p > 0,05$) al que se obtiene al aire, pero si se colocan las muestras en las horas de la tarde el CHF es estadísticamente diferente (valor $p < 0,05$), el promedio de secado al aire es inferior al secado solar. En Cartago, en todas las diferentes horas que se coloque la fibra de piña, los promedios de secado solar son menores que los de secado al aire (Cuadro 2).

Para Buenos Aires el tiempo de secado natural o al aire presentó menor duración que el reportado para la secadora solar (Figura 18a). En Guácimo a partir de las 9 horas comenzaron las diferencias estadísticas (valor $p < 0,05$), presentando el secado solar los menores promedios (Figura 18b).

Variación del Contenido de humedad con el tiempo de secado

En la Figura 19 se presenta la variación general promedio del CHI con respecto al tiempo de secado en los cuatro sitios. Río Cuarto es el lugar donde se dio la menor eficiencia en la secadora solar, ya que se presentan los mayores tiempos de secado y los CHI más altos en las diferentes horas. Seguidamente, cuando fue colocado un deshumidificador dentro de la secadora solar en los otros sitios, los tiempos de secado mejoraron, en el caso de Guácimo los tiempos donde el CHI fue más o menos constante fue a las 8 horas, mientras que en Buenos Aires y Cartago los tiempos de secado fueron de 5 horas.

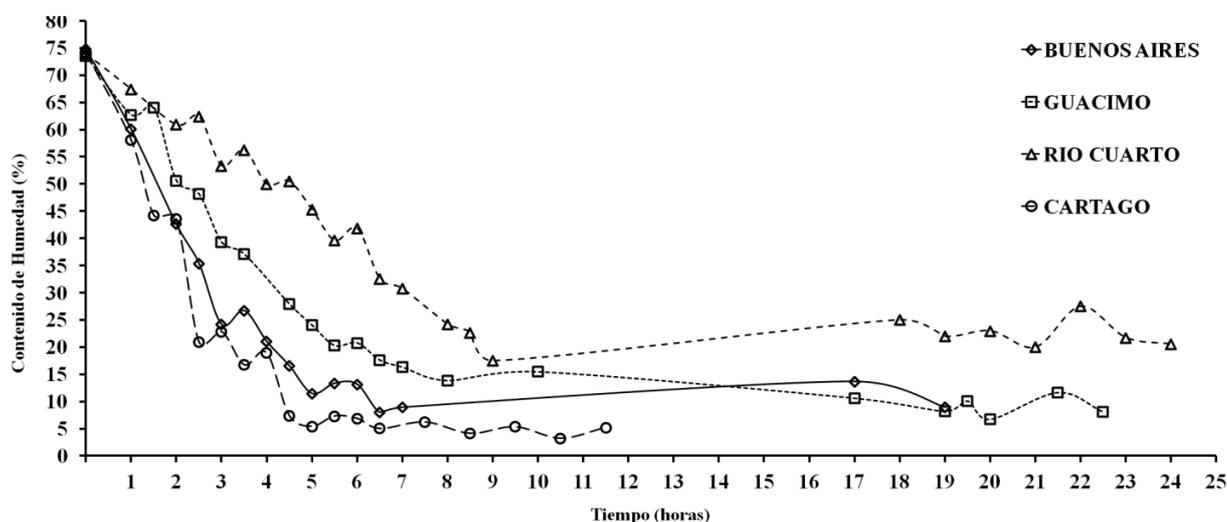


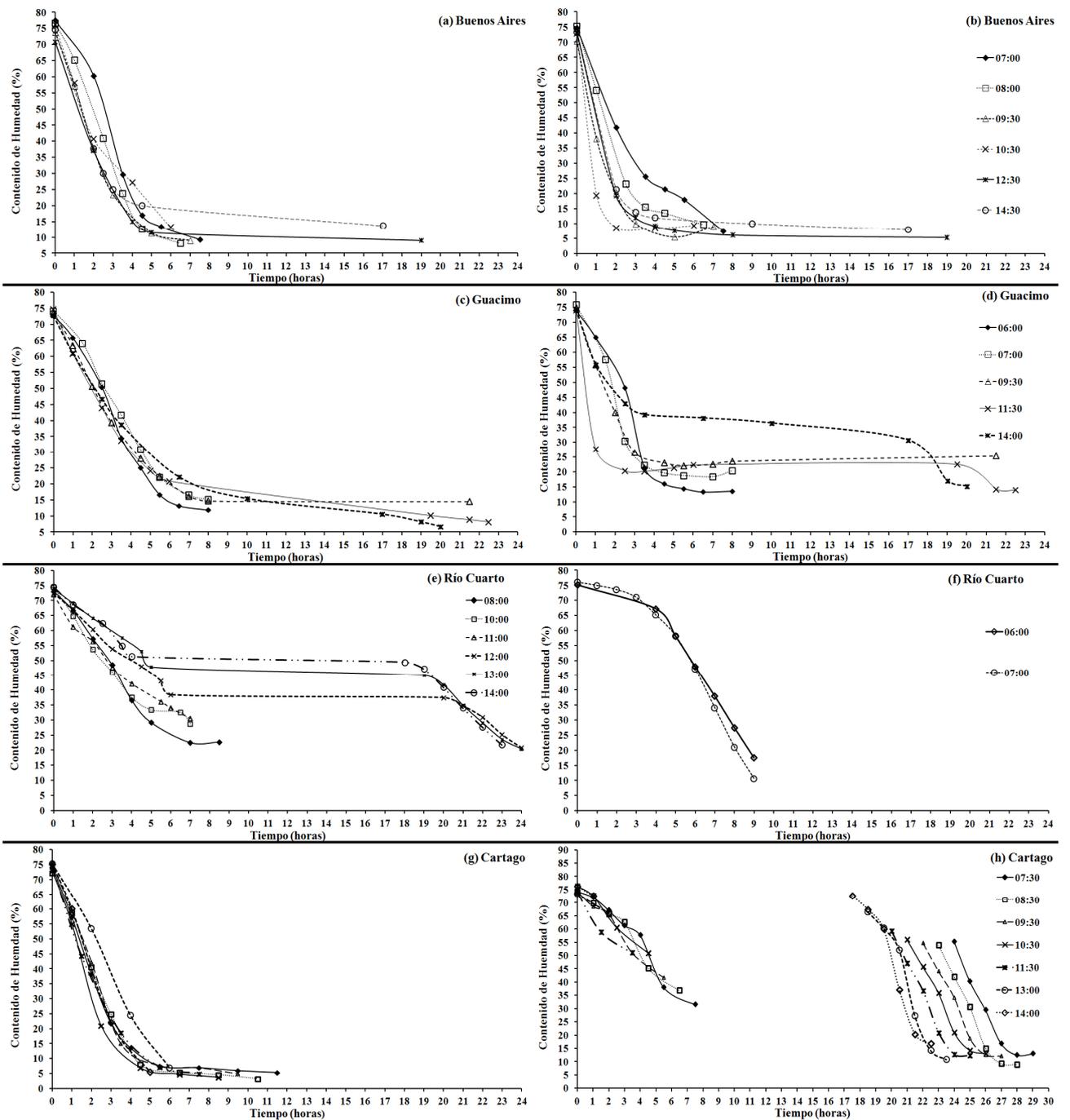
Figura 19. Contenido de humedad de los cuatro sitios en secado solar.

La variación del CH con respecto al tiempo de secado específico para los cuatro sitios en las diferentes horas que fueron colocadas las muestras dentro y fuera de la secadora aparece en la Figura 20. Durante las primeras 5 horas el CH decrece rápidamente hasta aproximadamente 15% en Buenos Aires y 8% en Cartago, para Guácimo el 15% de CH se alcanzó en 7 horas. Luego de este descenso, el CH se mantiene con pocos cambios hasta estabilizarse. En el caso

de las muestras colocadas luego de las 14 horas en ambos sitios, a diferencia de las muestras colocadas en la mañana, en ese período de tiempo (5 horas) el CH de las muestras fue de 25%, para terminar de secarse se necesitó que las muestras permanecieran en la secadora hasta el otro día (17 horas de secado) en el caso de Buenos Aires (Figura 20a) y Guácimo (Figura 20c). En tanto para Cartago el tiempo se extendió a solo 2 horas más para terminar el proceso de secado de la fibra de piña (Figura 20g). En Río Cuarto (figura 20e) solo se realizó el secado solar. Para las muestras colocadas a las 8, 10 y 11 horas se logró que después de 7 horas de secado el CH fuera de entre 25 y 30% (%CH considerado alto). En tanto que las muestras colocadas a las 12, 13 y 14 horas luego de un período de 6 a 7 horas el %CH disminuyó entre 45-50%. Este CH después de las 16 horas y en toda la noche no disminuyó por lo que se extendió el tiempo de secado hasta el otro día, el proceso tardó cerca de 24 horas (Figura 20e). No obstante, al siguiente día se colocaron otras dos muestras entre las 6 y 7 horas luego de 9 horas el CH fue bastante aceptable ya que estuvo entre 10 y 15 % (Figura 20f).

Al comparar resultados con los tiempos de secado al aire o natural, se encontró que para Buenos Aires (Figura 20b) el tiempo de secado al aire fue menor que el obtenido con el secado solar, para la mayoría de las horas de colocación de las muestras fue de 5 de horas el tiempo de secado. Pero en el caso de Guácimo (Figura 20d) el tiempo requerido para llegar a una estabilidad es de algunas horas menor al que se tiene en el secado solar (Figura 20c), 4 horas, no obstante el CH alcanzado en ese período es mayor que el obtenido en la secadora solar, que alcanzó un valor apenas de 20-25%, e incluso se presentaron algunas muestras con tiempos de secado sobre 20 horas y el CH siempre fue alto.

Finalmente, en Cartago se presentaron mayores ventajas para la secadora solar, las muestras secadas al aire durante el primer día, durante las primeras 8 horas solamente se lograron secar entre 35-45%, luego incluso el CH aumentó entrada la tarde y en toda la noche hasta el siguiente día que si se logró secar las fibras, pero luego de 24 horas (figura 20h).



Nota. Para Río Cuarto (e)= día uno y (f)= día dos.

Figura 20. Contenido de humedad según secado solar (derecha) y al aire (izquierda) por hora para cada uno de los sitios.

Análisis de resultados

Condiciones ambientales de la cámara

Los altos valores encontrados de HRI en Río Cuarto (73%, Cuadro 1) y su comportamiento durante el día (Figura 12), pueden ser explicados en primera instancia por la alta HRE en la región (Cuadro 1), lo que no permite un adecuado intercambio del aire húmedo dentro de la secadora por aire más seco del exterior. En segunda instancia, se presenta la influencia de la baja temperatura interna (promedio), de hecho, este lugar presentó el valor más bajo entre los sitios estudiados (Cuadro 1, Figura 14). En el proceso de secado es necesario que existan al menos 10°C de diferencia entre la TI y la TE (Benítez y Calderón, 1993). Así mismo otra posible explicación es que el diseño de la secadora no es adecuado ya que la HRI en la mayoría del tiempo fue similar o mayor a la externa (Figura 13a). Este inconveniente, por tanto no permite un adecuado desempeño de la secadora, resultando en un mal intercambio de la humedad interna por la externa (Solis et al., 2003 y Fuentes et al., 2003). Contrariamente, el mejoramiento de la HRI se dio en los sitios de Buenos Aires, Guácimo y Cartago por la utilización de un deshumidificador. En dicho sitios la humedad relativa promedio fue inferior a 49% (Cuadro 1) y se logra mantener esta diferencia en el transcurso del día, dando como resultando una HRI menor que la HRE (Figura 13b-13d).

No obstante, se tiene el inconveniente que la HRE luego de las 2 de la tarde (14 horas) empieza a aumentar hasta alcanzar valores muy cercanos a la saturación (Figura 13), provocando que la eficiencia de la secadora decaiga por un aumento de la HRI (Figura 12) luego de esta hora. Este resultado se presentó en Guácimo y Buenos Aires (Figura 12b y 12c). Posteriormente, cuando se solucionó este problema con la implementación del sistema para inyectar calor utilizado en Cartago, la HRI de la cámara mantuvo valores inferiores al 40% (Figura 13d). Indicando con ello que la adaptación de un sistema de calor, además de mejorar la temperatura, mejora las condiciones de HR dentro de la cámara, logrando una mayor eficiencia de la secadora.

La inyección de calor es una práctica común que se realiza cuando la RS es baja y en horas de la noche. En un diseño de secadora solar realizado por Karathanos y Belessitotis (1997) para el

secado solar de diferentes productos agrícolas (uvas, higos, ciruelas, entre otros), con capacidad para 5000 kg y el diseño de Durán et al. (2010) en Argentina para el secado de pimentones con una secadora de 2000 kg de capacidad, mejoraron las condiciones de temperatura y humedad dentro de la cámara de secado con la adaptación de sistemas de calefacción auxiliares, con gas y leña respectivamente.

Para la evaluación de la RS, se tiene que el promedio de RSD fue de 507 W/m^2 , valor muy similar al reportado por Ruslan et al. (2012) en Malasia, que fue de 577 W/m^2 . Entre el promedio general (Cuadro 1) de la RSD y la RSI se dio una diferencia de 127 W/m^2 . En Buenos Aires se obtuvieron los valores más elevados de RSD y RSI ($802\text{-}544 \text{ W/m}^2$) y en Cartago los más bajos ($249\text{-}238 \text{ W/m}^2$). Guácimo y Río Cuarto se comportaron de forma muy similar entre ellos. Diferencias debido a la posición en que se tomaron las mediciones y a la presencia de nubes intermitentes que ocasionaron disminuciones discontinuas de la RS.

Con respecto a la RS se tiene que para Guácimo y Río Cuarto se presentó un comportamiento irregular (Figura 11a y 11b), con altas y bajas de las magnitudes de los valores de radiación en diferentes horas del día, principalmente en Río Cuarto. Esta situación se debe a que dichas zonas se caracterizan por presentar nubosidad durante el día, dando como resultado variaciones irregulares de RS (Wright, 2002). Este comportamiento se refleja dentro de la secadora cuando se correlaciona los dos tipos de radiación (directa e indirecta) con la TI. En Río Cuarto con radiación muy irregular (Figura 11a), no se encontró ningún tipo de correlación (Figura 16a), pero en el caso de Guácimo, con una radiación más regular (Figura 11b) mejoró la correlación entre las variables, ya que existe la tendencia a aumentar la temperatura con la radiación (Figura 16b).

En Buenos Aires y Cartago, se presentó un comportamiento esperado en la radiación durante el día (Figura 11c y 11d), con bajas magnitudes en las primeras horas, para luego aumentar hasta las 13 o 14 horas y decaer en horas de la noche. Pero a pesar de ello, no se afectó significativamente la TI de la cámara (Figura 16e-16h). Esto puede ser explicado en Buenos Aires por el hecho de que y probablemente se dio la mayor eficiencia en los colectores solares de láminas de hierro ya que lograron canalizar adecuadamente la RS en calor, lo que

demuestra que la TE influencia en gran parte la TI de la cámara (Figura 17c). Mientras que en Cartago, su explicación puede ser debida a que la radiación fue muy baja en todo momento pero aun así constante (Figura 16g y 16h).

De forma general se observó que entre más alta sea la TE más alta es la TI, son directamente proporcionales una de otra. Sin embargo, este aumento de temperatura es diferente en cada sitio. Por ejemplo, en Río Cuarto y Guácimo los aumentos de TI debidos a la TE, son pocos, mostrado por la baja pendiente de la recta (Figura 17a y 17b). Pero en Buenos Aires y Cartago, el aumento de la TI por la TE si es más alto que los anteriores sitios, mostrado por la pendiente de la recta (Figura 17c y 17d). Demostrando con estos resultados que en estos dos sitios las condiciones internas de la secadora aumentan en función del aumento de la TE de la cámara.

La TI generalmente fue mayor a la TE, encontrando la mayor TI de 51 °C, similar al comportamiento reportado por Nandwani (2005) para la TI que fue de entre 50 y 70°C en uno de sus diseños de secador solar casero. Para el presente estudio, en promedio existió una variación de 7°C entre la TI y la TE (Cuadro 1). Las mayores temperaturas se dieron entre las 10 y 14 horas del día (Figura 14), similar al período comprendido entre las 11 y 14 horas reportado por Solís et al. (2003) en la evaluación de su secadora para madera de 3 m³ de capacidad desarrollado en Yucatán, México.

Finalmente, los anteriores resultados nos sugieren que la TI de la cámara está regulada no solo por las condiciones de radiación, sino que también a la temperatura externa que se presente en el sitio donde se coloca la cámara de secado. Además que el cambio realizado en el sistema de secado, de inyección de aire caliente para mejorar la temperatura en horas que se presenta baja temperatura y alta HRI, sin duda mejora las condiciones dentro de la cámara. Esto permite solventar los problemas de las condiciones climáticas de Costa Rica, altos valores de humedad relativa, especialmente al inicio de la mañana y en horas de la tarde y radiación solar habitualmente irregular por la nubosidad presente.

Contenido de humedad promedio (CH) y tiempos de secado

En relación al CHI se tiene que el promedio encontrado para la fibra de piña (cercano a 75%, Cuadro 2) es similar a lo reportado por Ruslan et al. (2012) y por Pangavhane et al. (2002), que reportan valores de entre 60 y 80% en sus investigaciones con diversos materiales. La diferencia encontrada a las 9:30 horas en Buenos Aires (Cuadro 2) probablemente se debió a que se utilizaron hojas de piña más secas en ese momento, lo cual repercutió con un CHI más bajo.

El resultado más importante obtenido y de gran influencia para el tiempo de secado, independientemente de la región geográfica donde se coloque la secadora, es la hora de colocación de las muestras, ya que colocadas después de las 12 horas requieren más tiempo para secarse que las colocadas de las 6 a las 11 horas. Este problema se acentúa más luego de las 14 horas en todos los sitios (Figura 20). La hora de colocación de la fibra dentro de la secadora, también trae efectos en los contenidos de humedad finales del material. Se observó que si se colocan en horas de la mañana se logran CHF más bajos que los encontrados en las colocadas en horas de la tarde (Cuadro 2). Estos resultados confirman nuevamente que debido a las condiciones ambientales en Costa Rica, en la tarde luego de las 14 horas, los valores de humedad relativa aumentan (Figura 13) mientras que los valores de temperatura bajan (Figura 11), luego de esta hora, provocando los aumentos en los tiempos de secado de los materiales, en este caso la fibra de piña que fue probada en la secadora solar.

La eficiencia de la secadora solar aumenta conforme se reduce el tiempo de secado para lograr un CH específico en un intervalo de tiempo razonable. Según las curvas de secado (Figura 20), el sistema obtuvo los mejores resultados en Cartago, sitio donde se presentó la menor cantidad de tiempo para llegar a un %CH determinado, seguido por Buenos Aires, Guácimo y Río Cuarto (Cuadro 2, Figura 20). Estos resultados demuestran el comportamiento de las condiciones ambientales de la cámara de secado con material húmedo dentro de ella.

Río Cuarto se destacó por ser el sitio con las condiciones de HRI más altas (Cuadro 1, Figura 13), poco efecto de la radiación solar (Figura 11a), y baja temperatura interna (Figura 13a y

15a), dichas condiciones hicieron por tanto aumentar el tiempo de secado (Figura 18c) y CHF de la fibra piña (Figura 20e y f) de entre los sitios estudiados.

Pero, cuando se mejoró la humedad relativa dentro de la cámara para Guácimo, Buenos Aires y Cartago (Figura 12) el tiempo de secado disminuyó (Figura 18), especialmente en Cartago que se realizó la inyección de aire caliente durante las horas de poca eficiencia en el secado. Mostrando en este sitio que todos los cambios prácticos para mejorar la eficacia en la secadora fueron satisfactorios.

Al comparar el secado solar, en tiempo y CHF alcanzado por las muestras, con el secado al aire, dio como resultado que las mayores ventajas de secar con la secadora solar se producen cuando las muestras son colocadas luego de las 12:30 horas en Buenos Aires, en Guácimo a partir de las 9:30 horas y en Cartago no importa la hora de colocación de las fibras, ya que en todo momento fue menor y se tubo bajos contenidos de humedad final, hay que destacar que en Cartago en horas de la tarde comenzó a llover lo que perjudico el secado al aire.

En el caso de la fibra de piña se puede afirmar que el secado solar es más eficiente que el secado al aire. Sin embargo en algunos sitios una combinación de secado al aire y secado solar pueden ayudar a mejorar la eficiencia en el secado, ya que en algunas circunstancias el secado al aire es mejor que el secado solar, como por ejemplo en el sitio de Buenos Aires. Es interesante que en este sitio en la época de verano, época donde se probó la secadora, el secado al aire produjo menores tiempos y bajos CH en casi dos horas menos en relación con el secado solar (Cuadro 2), pero no se llevo a secar completamente la fibra, no llevo a los CHF que logro la secadora solar (Figura 20a y b). Entonces, para lograr la máxima eficiencia de la secadora se podría dejar la fibra secando al aire en las primeras dos horas luego de extraído la fibra de la hoja, y luego se pasa a la secadora solar, para terminar de secar la fibra a adecuados CH.

Otro resultado importante de señalar, entre la secadora solar y su comparación con las condiciones de secado al aire, es lo ocurrido en Cartago. Acá se dieron las condiciones externas más bajas de todos los sitios e incluso llevo a llover en la tarde del primer día y fue donde se llevo a obtener la mejor eficiencia de la secadora solar, con marcadas diferencias

entre los tiempos de secado solar y al aire, siendo mucho más bajos los del secado solar, y más bajos %CHF (Figura 18d y Figura 20g y h). Dicho resultado nos sugiere que cuando las condiciones ambientales de baja temperatura y alta humedad relativa, la potencialidad de la secadora solar es aún mayor. Por tanto como afirma Kulanthaisami et al. (2009), “la secadora solar permite controlar en gran medida las condiciones en que se da el proceso de secado, brinda protección ante las inclemencias del tiempo y otros agentes que puedan perturbar el proceso como animales insectos entre otros, que no se puede lograr con el secado al aire”. Siempre y cuando para Costa Rica se cuente con un deshumidificador y una fuente alterna de calor.

Conclusiones

- El sitio de Buenos Aires presentó las mejores condiciones ambientales para el secado solar sin la ayuda de la inyección de calor, con las temperaturas internas y externas más altas, aparte de las humedades (interna y externa) más bajas y los índices más elevados de radiación solar.
- Se estableció que la temperatura interna de la secadora solar es proporcional a la temperatura externa, cuando no exista una fuente de calor extra para la cámara de secado. Así mismo el cambio de temperatura (ΔT), entre la temperatura interna en relación con la temperatura externa no depende únicamente de la radiación solar, sino de otra variable como la humedad relativa interna y externa.
- El sistema de inyección de calor permite que se mantenga una temperatura interna en la secadora mayor que la temperatura externa aunque esta sea 14°C más baja.
- Para los tiempos de secado la hora de colocación de las muestras influye directamente en el tiempo necesario para alcanzar un bajo contenido de humedad. El mejor intervalo para el secado de fibra de la planta de piña es desde las 6 hasta las 14 horas.

- En el sitio de Río Cuarto la ausencia del deshumidificador desfavoreció la temperatura y la humedad de la cámara de secado, mientras que en donde se utilizó este aparato estas variables fueron controladas sin problema.
- La secadora solar fue más eficiente en el secado de la fibra en Cartago seguido por Buenos Aires, Guácimo y Río Cuarto. En Cartago se dieron las peores condiciones externas, bajas temperaturas y humedad relativa, incluso lluvia, por lo tanto cuando las condiciones ambientales son adversas la potencialidad de la secadora solar es aún mayor siempre y cuando se utilice el deshumidificador y la fuente alterna de calor.
- Finalmente, los resultados encontrados nos sugieren que la temperatura interna de la cámara está regulada no solo por las condiciones de radiación, sino que también la temperatura externa que se presente en el sitio donde se coloca la cámara de secado. Además que el cambio realizado, inyección de aire caliente para mejorar la temperatura en horas que se presenta baja temperatura y alta humedad relativa interna, sin duda mejora las condiciones dentro de la cámara. Esto permite solventar los problemas de las condiciones climáticas de Costa Rica, altos valores de humedad relativa, especialmente al inicio de la mañana y en horas de la tarde y radiación solar habitualmente irregular por la nubosidad presente.

Recomendaciones

- Se deberían repetir las mediciones en todos los sitios al menos una vez más pero en fechas y estaciones diferentes para abarcar las condiciones que se tienen en la estación seca y lluviosa del país. Utilizando en todos los sitios el deshumidificador y la fuente alterna de calor.
- Realizar modificaciones en el cierre de las puertas, el sistema de unión entre el techo y la estructura principal y las ventilas para evitar las pérdidas de calor y la entrada de humedad del exterior.
- Se deberían realizar algunos ensayos cambiando el material del techo de policarbonato a vidrio.
- Se deben utilizar instrumentos automáticos para registrar las mediciones de las variables de humedad relativa, temperatura y radiación solar.

Bibliografía

- Alvarado, L. 2001. Climatología de la Atmósfera Libre sobre Costa Rica. San José, CR. Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio del Ambiente y Energía. 8(2): 89-115
- Azhari, A; Sopian, K; Zaharim, A; Al Ghoul, M. 2008. A new approach for predicting solar radiation in tropical environment using satellite images – case study of Malaysia. MY. Environment and Development. 4 (4): 373-378
- Bala, B; Woods, J. 1994. Simulation of the indirect natural convection solar drying of rough rice. Solar Energy. (53): 259-266
- Benítez, R; Calderón, A. 1993. Secador solar para madera. Tegucigalpa, HO, CEMAPIF - CUPROFOR. 23 p.

- Berinyuy, J; Tangka, J; Weka, G. 2012. Enhancing natural convection solar drying of high moisture vegetables with heat storage. CM. Department of Agricultural Engineering, Faculty of Agronomy and Agricultural Sciences, University of Dschang. 14 (1): 141-148
- Costales, R. 2010. Aplicación de la energía renovable en el secado. Estado del arte y su potencial en la producciones agrícolas. Instituto Cubano de Investigación de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA). La Habana, CU. 44 (2): 47-53
- Dadashzadeh, M. 2006. Design & fabrication of an active solar dryer for grape drying. M.Sc. Thesis. University of Shiraz.
- Durán, G; Condorí, M; Echazú, R; Russo, G. 2010. Secador solar híbrido para la producción continúa a escala industrial de pimiento para pimentón. In “IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII- SPES), Cusco, 1 -5.11.
- Eddy, J; Grandegger, A; Esper, M; Djaya, C. 1991. Development of a multi-purpose solar tunnel dryer for use in humid tropics. Renewable Energy. 1(2): 167-176
- Ekechukwu, O; Norton, B. 1999. Review of solar energy systems: An overview of solar drying technology. Energy Conversion and Management. (40): 615-655
- Fuentes, M; Luna, D; Osorio, J; Corona, J. 2003. Construcción y validación de un secador solar para madera aserrada. Chapingo, MX. Universidad Autónoma Chapingo. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente, (2):171-176
- Gallali, Y; Abujnah, Y; Bannani, F. 2000. Preservation of fruits and vegetable using solar drier. Renewable Energy. (19): 203-212
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional, CR).2009. Clima de Costa Rica y variabilidad climática. (en línea). Consultado el 3 de jun 2012. Disponible en <http://www.imn.ac.cr/educacion/CLIMA%20DE%20COSTA%20RICA.html>
- Janjai, S; Srisittipokakun, N; Bala, B. 2006. Experimental and modeling performances of a roofintegrated solar drying system for drying herbs and spices. Energy. (54): 378-391

- Karathanos, T; Belessitotis, G. 1997. Sun and artificial air drying kinetics of some agriculture products. *Food Engineering*, (31): 35-46.
- Kulanthaisami, S; Subramanian, P; Mahendiran, R; Venkatachalam, P; Sampathrajan, A. 2009. Drying Characteristics of Coconut in Solar Tunnel Dryer. Coimbatore, IN. Department of Bioenergy, Agricultural Engineering College and Research Institute, Tamil Nadu Agricultural University. *Madrass Agric. J.* 96 (1-6): 265-269
- Lotfalian, A; Ghazavi, M; Hoseinzadeh, B. 2010. Reviewing Drying of Dill and Spearmint by a Solar Dryer and Comparing with Traditional Dryers. *Shahrekord 115, IR. Department of Mechanical Farm Machinery, University of Shahrekord, World Applied Sciences Journal.* 8 (3): 364-368
- Machado, A; Oliveira, E; Santos, E; Oliveira, J. 2010. Estudio del Secado de Anacardo (*Anacardium occidentale L.*) mediante Secador Solar de Radiación Directa. *Información Tecnológica.* 21(1): 31-37
- MOTP (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, CR). 2005. División Territorial Administrativa de la República de Costa Rica. (en línea). Consultado 3 de jun 2012. Disponible en <http://proxy.mopt.go.cr/ign/IGN-Aspectos-Geogr%C3%A1ficos.html>
- Muhlbauer, W; Esper, A; Muller, J. 1993. Solar energy in agriculture. In *Proc. ISES Solar World Congress. Budapest.* pp 23-27
- Nandwani, S. 2005. Energía solar- conceptos básicos y su utilización. Heredia, CR. Laboratorio de Energía Solar, Departamento de Física. Universidad Nacional. pp 2-24
- Okala, N; Chigasa, U; Cynthia, I; Chidimma, O; Chibueze, N; Onuoragbunam, O; Ogbonna, O. 2011. Analysis and survey of the application of solar dryers in eastern Nigeria. *International journal of agricultural and biological engineering.* 4 (3)
- Pangavhane D; Sawhney R; Sarsavadia P. 2002. Design, Development and Performance Testing of a New Natural Convection Solar Dryer. *Energy* (27): 579-590.

- Ruslan, M; Fudholi, A; Othman, M; Azmi, M; Yahya, M; Zaharim, A; Sopian, K. 2012. The Double-Pass Solar Dryer for Drying Palm Oil Fronds. MY. Int. Conf. on System Science and Simulation in Engineering (ICOSSSE'11). pp. 143-149
- Salas, C; Moya, R; Cordoba, R. 2008. Diseño y construcción de un secador solar para madera. Kurú: Revista Forestal. CR. 5(13): 13 p
- Solís, L; Cerón, M; González, I. 2003. Diseño y operación de una estufa solar para secar madera. Merida, MX. Universidad Autónoma de Yucatán. Ingeniería Revista Académica, 7(3): 35-48
- Souza, L. 2007. Obtenção de tomates secos utilizando um sistema de secagem solar construído com materiais alternativos. In 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, Cusco. (6): 135-139
- Spitalnik, J. 2004. Demanda de Energía y Calidad de Vida en las Américas. Electronuclear. Rio de Janeiro, BR. (en línea). Consultado el 24 de mayo del 2012. Disponible en: http://pintassilgo2.ipen.br/biblioteca/cd/ijm/2004/pdf_files/2A-1.pdf
- Ulloa, J; Weerd, J; Huisman, E; Verreth, J. 2004. Tropical agricultural residues and their potential uses in fish feeds: the Costa Rica situation. Waste management. (24): 87-97
- Wright, J. 2002. Mapas de radiación solar en Costa Rica. Revista Tópicos de Meteorología y Oceanográficos 9 (2): 79-87
- Zhimin, L; Zhong,H; Tang, R; Liu, T; Gao, W; Zhang, Y. 2006. Experimental investigation on solar drying of salted greengages. Renewable Energy. (31): 837-847